LA RED TERRORISTA DEL 11-M • EVOLUCION DE LOS FELINOS



30 aniversario

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

EL CODIGO DE LA MEMORIA

OCEANOS MAS CALIDOS Y HURACANES MAS FUERTES

FUNCION MALIGNA DE LA INFLAMACION

CAMARAS OCULTAS EN LA PIRAMIDE DEL SOL

VISION TRIDIMENSIONAL



SEPTIEMBRE 2007
6,00 EUROS



Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN

Septiembre de 2007

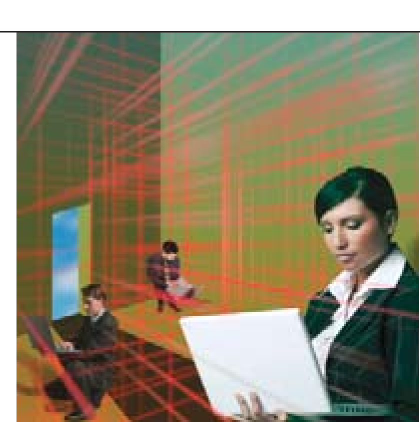
Número 372

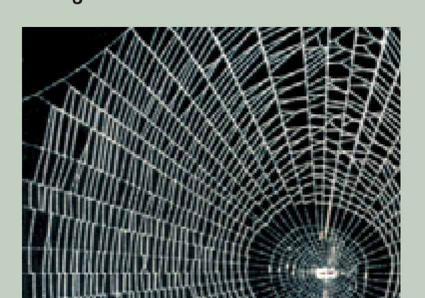














EDITA Prensa Científica, S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Telefax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca
Trigo, 39, Edif. 2
28914 Leganés (Madrid)
Teléfono 914 819 800

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD

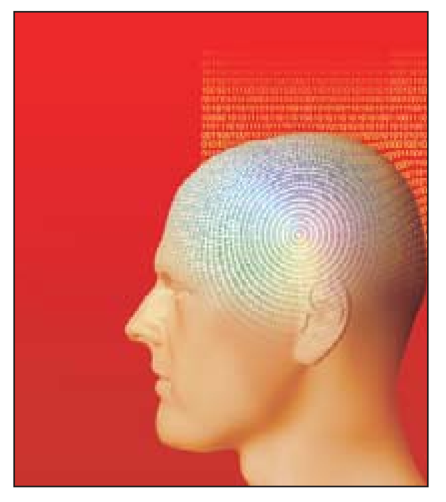
Madrid:
VdS Comunicación
Julia Domínguez
Dr. Fleming, 56 - 3.º dcha.
28036 Madrid
Tel. y fax 913 591 965
Móvil 649 879 433

Cataluña:
QUERALTO COMUNICACION
Julián Queraltó
Sant Antoni M.ª Claret, 281 4.º 3.ª
08041 Barcelona
Tel. y fax 933 524 532
Móvil 629 555 703

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Marián Beltrán: *Una tierra sin humanos*, *Desarrollo sostenible*; Luis Bou: *El código de la memoria*; Juan Manuel González Mañas: *Función maligna de la inflamación*; Anna Ferran: *Evolución de los felinos*; Néstor Herran: *Kelvin, Perry y la edad de la Tierra*; Bruno Moreno: *Apuntes*; J. Vilardell: *Hace...*, *Apuntes* e *Ideas aplicadas*; Ramón Muñoz Tapia: *Taller y laboratorio*



Portada: Jean-Francois Podevin

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	**Dos años**
España	65,00 euro	120,00 euro
Resto del mundo	100,00 euro	190,00 euro

Ejemplares sueltos:

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España



...cincuenta años

ADN. «Resulta difícil oponerse a la declaración de que el ADN es material genético. Admitido ello, el paso siguiente estriba en averiguar cómo se reproduce a sí mismo. La estructura en doble hélice del ADN sugiere una posible respuesta, de la que he tratado en un artículo anterior. En esencia, la idea es que ambas cadenas del ADN, que encajan una con otra como una mano en un guante, están separadas de tal modo que la mano hace de molde para la formación de un guante nuevo, mientras que el guante hace de molde para una mano nueva. Acabamos así con dos manos enguantadas donde antes sólo teníamos una. En términos químicos, lo imaginamos como si los monómeros proporcionados por la célula se alineasen a lo largo de la cadena molde con las bases complementarias emparejadas. *—F. H. C. Crick*»

La conferencia de Pugwash. «Durante seis días del pasado mes de julio, 22 científicos de 10 países se reunieron en la pequeña localidad canadiense de Pugwash (Nueva Escocia) para hablar sobre 'los peligros que para la humanidad plantea el desarrollo de armas de destrucción masiva'. Financiada por Cyrus Eaton, industrial de Cleveland natural de Pugwash, la conferencia fue la culminación a la convocatoria que, para una reunión de esa naturaleza, realizaron Albert Einstein y Bertrand Russell hace dos años. El grupo incluye científicos de EE.UU., la URSS, China y Japón. De entrada, acordaron 'no decir nada que pudiera parecer favoritismo hacia uno u otro de los dos grandes bloques en que el mundo está dividido'.»

...cien años

Una alimentación óptima. «A la viciada dieta de hace un siglo —la época de los hombres de tres botellas— le sobraba alcohol; hoy, al menos los estadounidenses, comemos demasiado, sobre todo carne. Ello es inherente a nuestra prosperidad. Y a ese efecto, el profesor Chittenden presenta un valiosísimo trabajo científico en el que se detallan los exhaustivos experimentos realizados en Yale por él y sus colaboradores durante seis años. Llega a la conclusión de que la calidad de los hábitos alimentarios es excesiva y que mediante la reducción de los alimentos proteicos, al menos en un cincuenta por ciento, se mejoraría la salud y el rendimiento y se aumentaría la longevidad.»

Trofeo aéreo. «Hace casi cuatro años los hermanos Wright anunciaron su éxito al aplicar un motor de gasolina a un aeroplano. Pero de ello no han hecho hasta ahora demostración pública alguna; y aunque, según sus propias declaraciones y las de testigos presenciales, han resuelto el problema, aún duda mucha gente. En cualquier caso, es probable que los avances en esta nueva ciencia los logren otros, y que en su momento se habrán perfeccionado varios tipos de máquinas más pesadas que el aire. Es con la idea de alentar a los inventores de la especialidad, mediante la entrega de un objeto de arte que valga la pena disputar, por lo que el trofeo *Scientific American* ha sido terminado y se ha presentado al Aero Club de América. Ese trofeo conmemora el aeródromo de Langley, a quien debemos el primer modelo de avión no tripulado que logró volar más de media milla.»

...ciento cincuenta años

Contador de agua. «Un abundante abastecimiento de agua para las ciudades constituye una bendición que no puede apreciarse lo suficiente. Mas, para evitar el derroche, se requiere un aparato que registre el consumo en cada casa o establecimiento. El contador que se representa en el grabado adjunto no requiere piezas ocultas, funciona prácticamente exento de pérdidas por rozamiento y ofrece una medida de gran precisión sea el caudal rápido o extremadamente lento.»



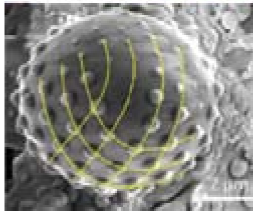
CONTADOR DE AGUA
(debe reducirse su tamaño), 1857

Control telegráfico. «Como un rayo cayó en la India la noticia de que los regimientos de nativos en Meerut y Delhi se habían amotinado, asesinado a sus oficiales, masacrado a toda la colonia inglesa en Delhi, entronizado al rey de Delhi y amenazaban al imperio. Todo ello ocurrió el 11 de mayo. El 13 lo sabían, gracias al telégrafo, todos los europeos sólo de la India, y digo sólo los europeos, pues inmediatamente se suspendió el servicio de correos y se embargó toda la correspondencia nativa. No es excesivo afirmar que el telégrafo salvó a la India. *—London Times*»

Un vestuario no ardiente. «Numerosas damas han muerto quemadas al prenderse fuego sus trajes de gasa ligera y batista antes de que hubiera tiempo de apagar las llamas. Las más expuestas a ello son las actrices y las bailarinas; así perdieron la vida artistas de talento como Clara Webster y otras. Por consiguiente, debería ser algo bien sabido por todo el mundo que remojando las prendas, o los materiales que las componen, en una solución diluida de cloruro de zinc, se consigue hacerlas perfectamente ignífugas.»

BIOLOGIA

El fandango de Fibonacci



La secuencia de Fibonacci, en la que cada número sucesivo es la suma de los dos previos (1, 1, 2, 3, 5...), aparece por doquier en la naturaleza. Describe, por ejemplo, la disposición espiral de las semillas de las fresas y el alabeo de las conchas de los nautilos. Ahora, unos investigadores de la Academia China de Ciencias han creado espirales de Fibonacci en materiales inorgánicos. Experimentaron con microestructuras de núcleos de plata y cáscaras de sílice. Las cáscaras rígidas se comban a medida que se endurecen sobre los núcleos adecuados y, si se favorece que adopten configuraciones cónicas durante el enfriamiento, se crearán irregularidades en forma de espirales de Fibonacci (*fotografías*). Los resultados corroboran una antigua conjetura de los biólogos: que esas espirales se originan para minimizar el espacio o el consumo de energía.

—Charles Q. Choi

MEDICINA

Regeneración sanguínea con células madre

Tras años diseñando el cóctel químico adecuado, Advanced Cell Technology, en Worcester, Massachusetts, han informado del cultivo de un gran número de hemangioblastos humanos, células madre embrionarias. En las placas de laboratorio, esas células precursoras desarrollaron tejidos que se asemejaban a las células madre hematopoyéticas, así como a vasos sanguíneos. El equipo las inyectó en partes del cuerpo de roedores dañadas por la diabetes y otras lesiones que dificultan el flujo sanguíneo. Los hemangioblastos llegaron hasta los vasos sanguíneos dañados y los ratones que los recibieron sobrevivieron a lesiones cardiacas en doble número que los ratones del grupo de control.

—J. R. Minkel

DEMOGRAFIA

¿Hay más vivos que muertos?

Se oye decir que la población mundial ha crecido tanto, que somos más quienes hoy vivimos que todos los que nos han precedido sobre el planeta. Hace más de treinta años, se afirmaba ya que el 75 por ciento de los humanos que habitaron aquí estaban vivos por entonces. En 1995, el demógrafo Carl Haub calculó cuántas personas habían vivido hasta esa fecha. Siete años después actualizó la cuenta.

A partir de los datos existentes, evaluó la tasa de crecimiento de la población a lo largo del tiempo. Calculó que hace diez mil años, cuando se produjo la revolución agrícola en Oriente Medio, vivían unos cinco millones de personas. Entre la aparición de la agricultura y el apogeo de Roma el crecimiento de la población fue muy lento, inferior al uno por mil anual. Para el año 1 de la era cristiana, la población debía de ser de unos 300 millones. Esa cantidad disminuiría más tarde, por culpa de las epidemias (la peste negra del siglo XIV mató al menos a 75 millones de personas). Así, hacia 1650 la población total sólo había aumentado hasta los 500 millones. Las mejoras agrarias y sanitarias habían más que doblado esa cifra en 1850. El crecimiento sería explosivo en adelante: en 2002 vivían 6.200.000 personas (más de 6.600.000 en julio de 2007).

Resulta que algo más de 106.000 millones de personas han nacido a lo largo de la historia de nuestra especie; las existentes en 2002 eran, pues, sólo alrededor de un 6 por ciento de ese número.

¿Y en adelante? La población está creciendo a una velocidad de alrededor de un 1,2 por ciento anual, ritmo menor que el mayor conocido, el 2 por ciento de finales de los años sesenta. Joel E. Cohen, profesor de demografía de las universidades Rockefeller y Columbia, no cree que la población mundial vuelva a doblarse. La ONU pronostica que en 2050 habrá entre 7300 y 10.700 millones de personas: suponiendo que la tasa de natalidad vaya disminuyendo, predice que la población se estabilizará en torno a los 10.000 millones pasado el 2200. En tal caso, los vivos nunca serán más que los muertos.

—Ciara Curtin



APPLIED PHYSICS LETTERS (*arriba*); ©*iStockphoto*/LUOMAN (*abajo*);

BIOLOGIA

Microquimerismo



Crías mellizas de tití a lomos de su padre biológico. El intercambio de células puede hacer que los hermanos estén más emparentados entre sí, y con una tía o un tío, que con su padre.

JEFFREY FITE *Universidad de Nebraska*

Como un modelo de armoniosa cooperación, la unidad familiar de los tities incluye vástagos que se quedan en casa después de alcanzar la madurez sexual para ayudar en el cuidado de sus hermanos más jóvenes y padres que comparten la tarea de transportar a los recién nacidos. Las madres disfrutan de un respiro. Según parece, todo el trabajo compartido y todos los cuidados podrían haber sido facilitados por un fluido sentido de identidad entre los monos. Un fenómeno que podría ofrecer una nueva perspectiva en el conocimiento de las reacciones del sistema inmunitario humano antes células foráneas.

Cuando Corinna Ross, de la Universidad de Nebraska, se propuso determinar si unas muestras de pelo podrían constituir una fuente adecuada de material genético para las pruebas de paternidad del tití, encontró que muchas contenían un mosaico de células, algunas con una dotación de genes propia del individuo y otras con un perfil de ADN que sólo era similar en un 50 por ciento, como el de un hermano; estas células pertenecían a los gemelos bivitelinos de los animales.

En pruebas ulteriores se puso de manifiesto que este microquimerismo —el acarreo de células de otros sujetos o ADN extraño—, se extendía a la totalidad de los 17 órganos muestreados, así como a los óvulos y al esperma.

Las propias células germinales eran quiméricas. A propósito de eso, Ross descubrió que el óvulo de una tití hembra que llevaba el ADN de su hermano había dado origen a una cría de tití cuya madre genética era realmente su tío biológico. De 36 gemelos bivitelinos examinados, 26 portaban células quiméricas en al menos un tejido. Los tities son modelos habituales para estudiar la inmunidad; desde antiguo se conoce el considerable quimerismo presente en su médula ósea, donde se generan la sangre y las células inmunitarias. Según Ross, durante una etapa clave de los inicios del desarrollo fetal, los mellizos tities comparten suministro sanguíneo y placentas fusionadas, permitiendo un flujo abundante de células fetales entre los miembros de la camada. Saber cómo los tities mantienen la tolerancia inmunitaria a tantas células foráneas a lo largo de la vida ayudaría a los investigadores que tratan de impedir el rechazo humano de los órganos trasplantados o de los trasplantes de médula.

Los estudios en los tities podrían también arrojar luz sobre algunas enfermedades autoinmunitarias de los humanos. Una prueba sugiere que algunas patologías, como la esclerodermia, cuyos síntomas a menudo reproducen los del rechazo de médula ósea, podrían no ser ataques contra el propio cuerpo, sino respuestas a células quiméricas foráneas, propone Anne Stevens, de la Universidad de Washington. Y añade que una posibilidad alternativa estribaría en que fueran las células foráneas las que atacaran al huésped.

Stevens ha encontrado células maternas presentes en los órganos atacados de los niños que sufren el síndrome del lupus neonatal, así como en el páncreas de los varones con diabetes tipo 1. Los estudios preliminares del grupo de Stevens muestran que en los tejidos de los niños varones, las células maternas pueden llegar a ser hasta 1 de cada 1000.

Está ampliamente documentado el canje bidireccional de células entre madres y fetos en humanos. Por lo general se creía que, como ocurre con los tities, el quimerismo se limitaba a la médula ósea e iba desapareciendo con el tiempo. El microquimerismo en la médula ósea de los gemelos bivitelinos constituye también un fenómeno común; para Stevens puede representar hasta un 20 por ciento de las células. Se han identificado algunos ejemplos raros de células de hermanos en diversos órganos, tales como una joven con un hermano mellizo que llevaba ADN de varón en varios de sus tejidos. No obstante, nadie ha buscado microquimerismo fraterno por todo el cuerpo. Como se encuentran células microquiméricas en personas que no sufren ninguna enfermedad, las implicaciones sanitarias del extendido quimerismo humano, en caso de que ocurra, siguen sin estar claras.

En cuanto a los tities, la ambigüedad genética arroja nueva luz sobre los estrechos lazos familiares de la especie. Una vez que la secuenciación del genoma del tití esté concluida, resultará más fácil determinar qué genes de los hermanos podrían hallarse operativos en los tities quiméricos. Los hallazgos de Ross ofrecen un incentivo para toda esa cooperación familiar: cuando un tití cuida paternal de su prole, puede muy bien estar cuidando de la prole de su hermano.

—Christine Soares

FISICA

¿Por qué en los cubitos de hielo se forman a menudo picos de hielo?



El agua es una de esas insólitas sustancias que se dilatan al congelarse. Si sobre agua líquida se forma una capa de hielo con un orificio, éste retendrá el líquido sin dejarle espacio para dilatarse durante la congelación. Así, cuando el agua empiece a solidificarse, se verá obligada a subir por el orificio y se irá helando en torno a su borde, formando un "pico de hielo" hueco y lleno de agua.

El agua seguirá subiendo pico arriba: se creará una pequeña chimenea, que quizá llegue a ser muy larga y delgada. El agua acabará congelándose y el pico se volverá macizo. La energía necesaria para elevar el agua pico arriba procede por completo del proceso de dilatación por congelación.

Algunas características que gobiernan el modo en que el agua cristaliza desempeñan papeles importantes en el proceso de formación del pico. La forma de los cristales de hielo depende de la velocidad de enfriamiento; dependerá, por tanto, de la temperatura del aire. Por lo general, los picos se forman cuando el aire ambiente se halla por debajo de cero grados en una medida suficiente para favorecer una congelación rápida. Una temperatura del aire de unos –7 grados resulta óptima.

El enfriamiento rápido propicia la formación de cristales laminares, que cubren enseguida la superficie. Algunas láminas cuelgan hacia el interior del agua como cortinas; tienden a unirse en ángulos de 60 grados, de manera muy parecida a los brazos de un copo de nieve. Es característico que dejen orificios triangulares en la superficie, de ahí que los picos suelan presentar una base triangular. Los lados de los picos son a veces la prolongación de cristalitos que ya había debajo de la superficie del agua que se está congelando; esa es la razón de que algunos picos se extiendan desde la superficie con pendientes bastante empinadas. Es también posible que surjan estructuras que recuerden a pequeñas pirámides invertidas, o "jarrones de hielo"; así ocurrirá si el agua escapa antes de congelarse del todo.

Para la formación de picos son mejores el agua pura y los recipientes de paredes verticales, como las bandejas de hielo de los congeladores de los frigoríficos domésticos. A veces vemos picos en bañeras de pájaros o en platos de bebida de animales domésticos cuando se han dejado esos objetos al aire libre por la noche. También se forman en los copos de aguanieve descendentes. Pero es bastante raro que se formen en masas de agua —en las superficies de lagos y estanques, por ejemplo—: su velocidad de enfriamiento no suele ser lo bastante rápida.

Stephen Morris
Universidad de Toronto

SIDA

Acceso universal a la muerte



KENNETH LIBBRECHT (*arriba*); BUNDESREGIERUNG (*abajo*)

La campaña "Tres para el cinco" de la Organización Mundial de la Salud y de Onusida pretendía que en 2005 recibiesen terapia antirretroviral tres millones de enfermos de sida de los países pobres y medianos. Para diciembre de 2006 la recibían sólo dos millones. No obstante, un comunicado oficial de la cumbre del G8 de 2005 en Gleneagles decía que ese grupo de naciones hegemónicas se esforzaría por "acercarse cuanto sea posible al acceso universal al tratamiento [contra el VIH y el sida] de todos aquellos que lo necesiten en 2010". Que serán unos diez millones. Un comunicado análogo de la cumbre de Heiligendamm, celebrada en junio de 2007, dice en sus puntos 48 y 57 que el "G8 reafirma su compromiso" de "incrementar sus esfuerzos" en pos del "acceso universal" hacia 2010. Sin embargo, el punto 58, pese a su vaguedad, parece contradecir ese propósito: "Como paso importante en el incremento de los esfuerzos encaminados a la meta del acceso universal ... los miembros del G8 ... a lo largo de los próximos años ... velarán por el tratamiento antirretroviral ... de aproximadamente cinco millones de personas." Según el informe *Hacia el acceso universal,* publicado en abril de 2007 por la OMS, Onusida y Unicef, el número de personas que están recibiendo antirretrovirales en los países pobres y medianos está creciendo cada año más o menos en la misma cantidad: unas 700.000. Es decir, el "incremento" del esfuerzo por parte del G8 sólo consistiría en mantener el "esfuerzo" actual. Para llegar al acceso universal, como indica el informe, el número de tratados no tendría que aumentar a ese ritmo constante; debería acelerarse mucho. Sin antirretrovirales, la mayor parte de los enfermos vive menos de dos años una vez que la infección por VIH les ha conducido al sida. En estos momentos están muriendo como consecuencia de la infección por VIH cerca de tres millones de personas al año. Infectadas hay entre 34 y 47 millones.

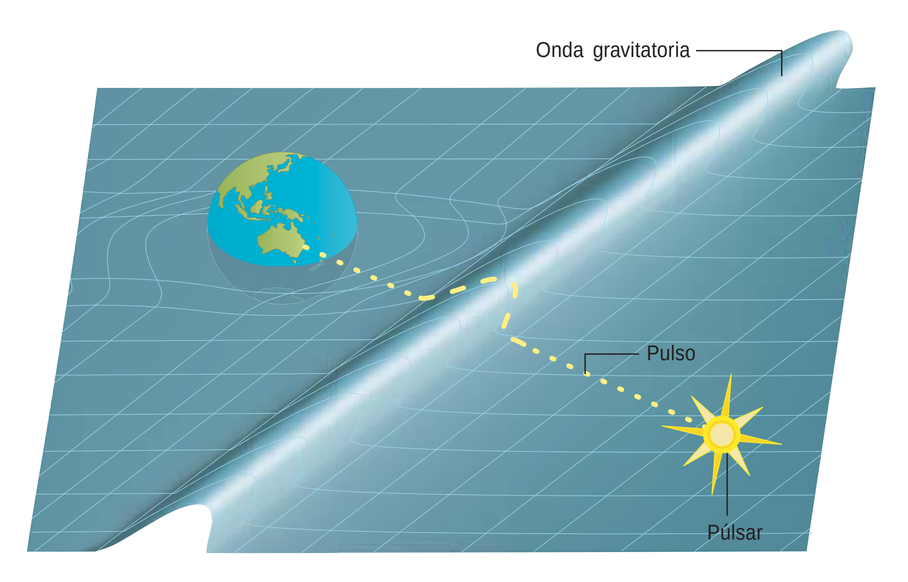
ASTROFISICA

A la escucha del espaciotiempo

Si alguna vez colisionasen contra la Tierra un par de agujeros negros, se les oiría llegar: no mediante el sonido, que no puede cruzar el vacío del espacio, sino mediante las ondas de fuerza gravitatoria que, a medida que los agujeros se fueran aproximando, deformarían perceptiblemente los huesos de nuestro oído interno, produciendo una suerte de gemido, como el del flash de una cámara fotográfica al cargarse. En circunstancias normales, esas ondas son completamente inaudibles, aunque estén siempre reverberando en nuestro cuerpo. Las ondas que llegan hasta nosotros, debilitadas por las vastas distancias cósmicas, alteran la longitud de los huesos y de otros objetos en una distancia inferior al diámetro de un protón.

Para oírlas, se necesitaría un micrófono hipersensible, como el Observatorio de Ondas Gravitatorias mediante Interferómetro Láser (LIGO), cuyas instalaciones gemelas en los estados de Washington y Luisiana vienen a ser una especie de peculiares telémetros láser concebidos para encontrar las oscilaciones inducidas por las ondas en la longitud de los propios instrumentos. Hay, sin embargo, otros métodos para detectarlas. Un nuevo estudio apunta a que uno de ellos permitiría incluso comprobar si la teoría general de la relatividad de Einstein nos cuenta todo lo que hay que saber en lo referente a la gravitación. Se valdría de los púlsares, estrellas que parpadean con la regularidad de un reloj atómico. Si una onda pasase entre nosotros y un púlsar, estiraría y comprimiría alternativamente la distancia entre pulsos, de modo que el parpadeo parecería frenarse y acelerarse. A diferencia de la utilización de los púlsares en el pasado para investigar la existencia de las ondas gravitatorias, esta técnica recogería los efectos directos de las ondas.

Las ondas procedentes de la fusión de grandes agujeros negros o de procesos que tuvieron lugar en los primeros tiempos del universo podrían alterar el período de los pulsos en una parte entre 10^{15}, una desviación de un microsegundo en diez años. Las vibraciones que se produjesen más rápidamente que una vez cada pocos años serían absorbidas por el ruido. LIGO tiene el problema contrario: es incapaz de percibir las vibraciones lentas, debido a la actividad sísmica. Así pues, ambas técnicas se complementan.



Una onda gravitatoria que se cruce en el camino de la señal de un púlsar alterará el espaciamiento entre pulsos y, por tanto, su período. La desviación sería de un microsegundo en 10 años.

Para distinguir las fluctuaciones temporales reales de las espurias, se compararían docenas de púlsares. De acuerdo con la teoría de la relatividad, las ondas gravitatorias vibran en ángulo recto con la dirección de propagación, estirando los objetos en una dirección y encogiéndolos en la perpendicular a esa. En consecuencia, las ondas harían que un púlsar pareciera frenarse, mientras que se aceleraría otro que estuviese a 90º del primero. El ruido no se ajustaría a ese esquema.

Kenja Lee, Fredrick Jenet y Richard Price, de la Universidad de Texas en Brownsville, han adaptado el procedimiento para que tenga en cuenta teorías gravitatorias diferentes de la de Einstein, teorías que predicen que los objetos podrían verse alternativamente estirados y comprimidos en todas las direcciones a la vez (como si estuviesen respirando) o en la dirección de propagación (se trataría de ondas longitudinales). Los púlsares son el único medio factible de acceder a estos esquemas vibratorios alternativos, que representarían distintos tipos de partículas en una teoría cuántica de la gravedad. “Por fin hay alguien que se atreve a pensar en ondas gravitatorias que no se ajusten a la teoría de la relatividad general”, dice el experto en períodos de púlsares Andrea Lommen, del Colegio Franklin and Marshall.

Pero el procedimiento no se ha puesto aún en práctica. El equipo todavía no ha llegado a una conclusión acerca de la intensidad de los esquemas vibratorios de alternativas a la relatividad verosímiles o sobre cómo se desentrañaría una mezcla de esquemas. El radiotelescopio Parkes, en Australia, viene observando veinte púlsares una vez cada dos semanas desde 2004 y todavía no ha percibido ninguna onda gravitatoria, ni einsteiniana ni de ninguna otra clase. No sorprende: tres años es un espacio de tiempo demasiado breve. LIGO tampoco ha detectado aún ninguna onda gravitatoria.

—George Musser

ASTRONOMIA

Parecido a la Tierra

El planeta extrasolar más parecido a la Tierra descubierto hasta ahora, con una masa que quintuplica la terrestre, orbita alrededor de una estrella enana roja, Gliese 581, a unos 20,5 años-luz de distancia. Las temperaturas en el planeta podrían caer entre cero y 40 ºC. Según Stephane Urdí, del Observatorio de Ginebra y a cuyo equipo se debe el descubrimiento, la distancia entre el planeta y su estrella es la justa para que pueda existir agua líquida en su superficie.

—J. R. Minkel

LUCY READING-IKKANDA

Una tierra SIN HUMANOS

Una forma diferente de examinar la influencia de la humanidad en la naturaleza: preguntarse qué sucedería si nos extinguiésemos de repente

Una entrevista con ALAN WEISMAN



VUELTA A LA NATURALEZA: Si todos los seres humanos desapareciéramos, Manhattan volvería a ser, con el tiempo, una isla arbolada. En unas cuantas docenas de años, muchos rascacielos se habrían venido abajo, inundados de agua sus cimientos; los edificios de piedra, como la catedral de San Patricio (*a la derecha*), sobrevivirían más tiempo. La maleza y los árboles enraizarían en las grietas del pavimento, las aves de rapiña anidarían en las ruinas y los zorros vagarían por las calles.



Una fantasía muy común es la de imaginar que se es la última persona que queda viva en la Tierra. ¿Y si *todos* los seres humanos desapareciéramos de repente? Este es el punto de partida de *El mundo sin nosotros* de Alan Weisman, de la Universidad de Arizona. En ese experimento mental no se especifica qué acaba con el *Homo sapiens*; Weisman se limita a presuponer nuestra extinción súbita y a partir de ahí, razona acerca de lo que sucedería en los años, decenios y siglos subsiguientes.

Según Weisman, las infraestructuras empezarían a desmoronarse casi inmediatamente. Sin servicios de limpieza ni brigadas de obras, avenidas y autopistas se resquebrajarían en cuestión de meses. A lo largo de los decenios siguientes, muchos edificios se derrumbarían. Pasaría mucho tiempo, sin embargo, antes de que ciertos objetos corrientes se deteriorasen. Los cacharros de acero inoxidable, por ejemplo, durarían milenios, especialmente si quedaran enterrados en los montículos de escombros recubiertos de maleza en que se habrían convertido las cocinas. Algunos plásticos podrían mantenerse intactos durante cientos de miles de años; no se destruirían mientras los microorganismos no desarrollasen en su evolución la capacidad de consumirlos.

Steve Mirsky entrevistó a Weisman para averiguar por qué escribió el libro y qué lecciones se pueden extraer de su investigación.

Si los seres humanos desaparecieran mañana, el perfil urbano de Manhattan no les sobreviviría mucho tiempo. Weisman describe la transformación de la “jungla de asfalto” de Nueva York en un verdadero bosque.

¿Qué pasaría con lo que hemos ido haciendo si ya no estuviésemos aquí? ¿Podría la naturaleza borrar nuestras huellas? ¿Hemos construido algo indestructible o indeleble? ¿Convertiría la naturaleza a Nueva York en el bosque que era cuando Henry Hudson llegó allá en 1609?

Fue fascinante hablar con los ingenieros y operarios de mantenimiento de Nueva York sobre lo que les cuesta mantener a raya a la naturaleza. Descubrí que nuestras infraestructuras, tan monumentales, subsisten y funcionan, pese a lo indestructibles que parecen, sólo gracias a unos cuantos individuos; de ellos dependemos todos. Manhattan es una palabra india que significa colinas, porque la isla tuvo antaño muchas. La allanaron para implantar la actual retícula de calles. Alrededor de esas colinas fluían unos 40 riachuelos; por toda la isla había manantiales. ¿Qué ocurrió con esa agua? Hoy llueve en Manhattan como entonces, pero el agua se queda ahora bajo tierra. Aunque una parte fluye por los colectores de aguas residuales, las cañerías drenan peor que la naturaleza y hay mucha agua subterránea que intenta aflorar. Incluso en un día soleado, los encargados del metro tienen que bombear 50 millones de litros de agua; si no, los túneles se inundarían.

¿QUIEN NOS

Se dice que la naturaleza detesta el vacío. Si los humanos desapareciéramos, ¿podría otra especie evolucionar hasta el punto de tener un lenguaje, fabricar herramientas, practicar la agricultura y dominar la Tierra? Según Alan Weisman, habría una razonable probabilidad de que los babuinos se desarrollasen así. Tienen un cerebro grande y al igual que a nosotros, la reducción en Africa de su hábitat selvático les ha obligado a adaptarse a vivir en sabanas. Ha escrito: “Si los ungulados dominantes

FOTOILUSTRACION DE KENN BROWN Y FOTOGRAFIA DE EMILY HARRISON (*páginas anteriores*); KENN BROWN Y EMILY HARRISON (*abajo a la izquierda*); KENN BROWN (*abajo a la derecha*); DAVID KEATON *Corbis* (*babuino*)

LA LENTA DESAPARICION DE LA HUELLA DE LA HUMANIDAD: SECUENCIA DEL DECLIVE DE NUEVA YORK

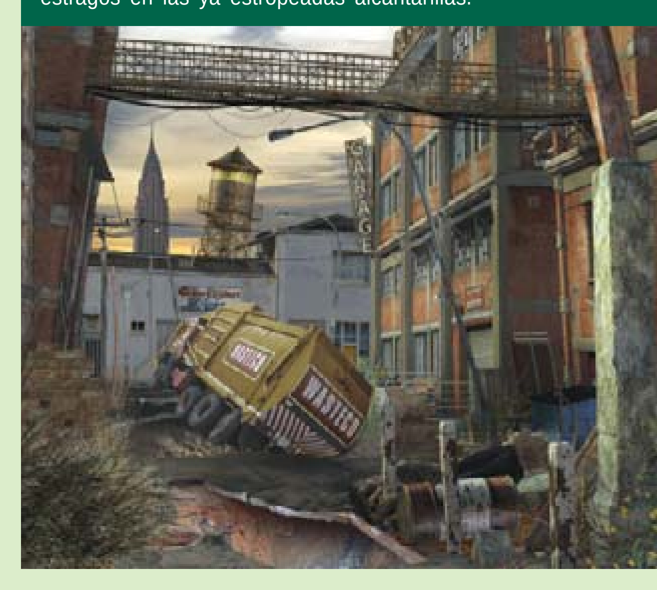
2 DIAS DESPUES DE LA DESAPARICION DE LOS SERES HUMANOS
Sin el bombeo constante de agua, el metro de la ciudad de Nueva York se inunda completamente.



7 DIAS
Los reactores nucleares se queman o funden al fallar los sistemas de refrigeración.

1 AÑO
Los pavimentos de las calles se rajan y abomban con la congelación y descongelación del agua de las grietas.

DE 2 A 4 AÑOS
Las calles agrietadas se cubren de maleza y, más tarde, de árboles, cuyas raíces levantan las aceras y causan estragos en las ya estropeadas alcantarillas.



REEMPLAZARIA?

de la sabana —el ganado— desapareciesen, los ñúes ocuparían su lugar. Si los humanos desapareciesen, ¿ocuparían los babuinos el nuestro? ¿Se detuvo el desarrollo de su capacidad craneana durante el Holoceno porque les llevamos la delantera, al ser los primeros en bajar de los árboles? Si ya no nos interpusiésemos en su camino, ¿aprovecharía su potencial mental la ocasión para desarrollarse rápidamente y, en una repentina escalada evolutiva, ocupar cada recoveco de nuestro nicho vacante?"

Podría haber una segunda salida de Africa cientos de miles de años después de la primera. ¿Qué harían los arqueólogos babuinos del futuro con los artefactos humanos enterrados bajo sus pies? Weisman supone que el desarrollo intelectual de cualquier criatura que los desenterrase podría saltar súbitamente a un plano evolutivo superior. Moldearíamos el futuro incluso tras habernos ido.

—Edward Bell

Atajar las subidas de nivel de los ríos subterráneos, que corroen las vías, supone una lucha constante en algunas partes de Manhattan. Si se visita una estación de bombeo, se verá salir el agua a chorros, en cantidad enorme, y las bombas que la extraen. Imaginemos, pues, que los humanos desapareciéramos mañana. Se cortaría el suministro de energía eléctrica. Gran parte de la energía que consumimos se produce en centrales nucleares o de carbón, que poseen dispositivos de seguridad automáticos que las desconectan en caso de que falte el control humano. Al cortarse el suministro de energía las bombas dejarían de funcionar, y con las bombas inactivas, el metro se llenaría de agua. En 48 horas habría ya múltiples inundaciones en Nueva York, algunas aflorarían a la superficie. Se desbordarían las alcantarillas, que muy pronto se atascarían con desechos, al principio innumerables bolsas de plástico abandonadas por la ciudad, más tarde hojas caídas.

Bajo tierra habría corrosión. Las columnas de acero que sujetan el techo —en realidad la calle— de la estación de Avenida Lexington se corroerían hasta derrumbarse. Las calles se resquebrajarían con socavones, en veinte años escasos. Pronto, algunas se convertirían en los ríos que corrían por la superficie de Manhattan antes de que se construyese la ciudad.

Muchos edificios de Manhattan están anclados en roca firme. Pero aun con vigas de acero en sus cimientos, no aguantarían una inundación permanente. Los edificios se vendrían abajo. Y por el cambio climático, habrá más huracanes en la costa Este. Los edificios que se derrumbasen se llevarían por delante a dos más. Caerían semillas en los nuevos solares, y arraigarían en las grietas del suelo. Echarían raíces entre los desechos de las hojas, pero la cal del hormigón pulverizado ofrecería a diversas especies un medio menos ácido. Se iría creando un ecosistema propio de la ciudad. Cada primavera, cuando la temperatura oscilara por encima y por debajo del punto de congelación, aparecerían nuevas grietas. El agua se colaría por ellas y se congelaría. Las grietas se ensancharían y las semillas irían a parar a su interior. Ocurriría en poco tiempo.

¿Cómo cambiarían los ecosistemas de la Tierra, si desapareciéramos?

Para entender cómo sería el mundo si no estuviéramos en él, visité lugares que, por la razón que fuese, han quedado abandonados. Uno de ellos es el último fragmento de bosque primigenio que hay en Europa. Es igual al que nos imaginábamos de niños cuando nos leían los cuentos de los hermanos Grimm: oscuro, turbador, con lobos aullando y toneladas de musgo colgando de los árboles. *Todavía* existe un lugar así. Se halla en la frontera entre Polonia y Bielorrusia. Fue coto de un duque lituano del

KENN BROWN Y EMILY HARRISON

4 AÑOS
Sin calor, las casas y edificios de oficinas caen víctimas de la congelación-descongelación y empiezan a caer.

5 AÑOS
Muchas partes de Nueva York se han quemado; un rayo que dé en unas ramas secas de Central Park puede fácilmente provocar un incendio catastrófico.



20 AÑOS
Se forman docenas de arroyos y marismas en Manhattan al llenarse de agua las calles cuyo suelo ha cedido.

100 AÑOS
Los tejados de casi todas las casas se han hundido, acelerando el deterioro de las estructuras.



300 AÑOS
Los puentes suspendidos se han venido abajo. Los arcos de los puentes, especialmente los diseñados para sostener el ferrocarril, pueden durar varios cientos de años más.

500 AÑOS Bosques maduros cubren la ciudad.

LA LENTA DESAPARICION DE LA HUELLA DE LA HUMANIDAD

5000 AÑOS
Al corroerse los revestimientos de las cabezas nucleares, se libera el plutonio radiactivo 239.

15.000 AÑOS
Caen los últimos remanentes de los edificios de piedra ante el avance de los glaciares de una nueva edad del hielo.



35.000 AÑOS
Se disipa finalmente el plomo que las emisiones de los automóviles depositaron en la Tierra durante el siglo XX.

100.000 AÑOS
La concentración de dióxido de carbono de la atmósfera vuelve a niveles preindustriales.

10 MILLONES DE AÑOS
Las esculturas de bronce, muchas de las cuales todavía mantienen su forma original, sobreviven como reliquias de la era humana.



siglo XIV que luego sería rey de Polonia. A lo largo del tiempo, serviría para las cacerías de reyes polacos y zares rusos. El impacto humano ha sido escaso. Después de la Segunda Guerra Mundial fue declarado parque nacional. Entre esos árboles imponentes, más que extrañeza, se siente plenitud. Hay allí robles y fresnos que rondan los 50 metros de altura y 3 metros de diámetro, con surcos tan profundos en la corteza que los pájaros carpinteros introducen piñas allí. Además de lobos y alces, alberga la última manada de *Bison bonasus*, el búfalo europeo.

Visité también la zona desmilitarizada de Corea. Esa franja de tierra, de alrededor de 250 km de largo por 4 km de ancho, separa a dos de los mayores ejércitos del mundo. Entre las posiciones del uno y el otro se ha creado espontáneamente una reserva de animales. Se ven allí especies que estarían ya extinguidas si no fuera por esa tierra de nadie. A veces se oye a los soldados gritarse unos a otros con altavoces o intercambiando mensajes propagandísticos. En medio de esta tensión, invernan bandadas de grullas.

Mas, para comprender de verdad cómo sería un mundo sin personas, tenía que saber cómo fue antes de que existiésemos. Marché a Africa, donde surgimos y único continente donde todavía encontramos animales enormes. Antes vivían en todos los continentes y en muchas islas. Había perezosos mayores que mamuts, castores del tamaño de un oso. Se debaten aún las razones de su desaparición, pero muchos indicios apuntan a que nosotros fuimos la causa. Parece que las extinciones que ocurrieron en todos los continentes coincidieron con la llegada de los seres humanos. En Africa, sin embargo, humanos y animales evolucionaron juntos; los animales aprendieron estrategias para evitar que los depredásemos. Poco después de que desapareciéramos, los ciervos medrarían en Norteamérica. A medida que los bosques se fuesen restableciendo, la evolución daría lugar, en los plazos de tiempo que le son propios, a herbívoros de mayor

LOS QUE GANARIAN...

Nuestra desaparición supondría una ventaja para muchas especies. Lo que sigue es una pequeña muestra de animales y plantas que saldrían ganando.

AVES: Sin rascacielos ni cables eléctricos, por lo menos mil millones de pájaros se librarían cada año de romperse el cuello.

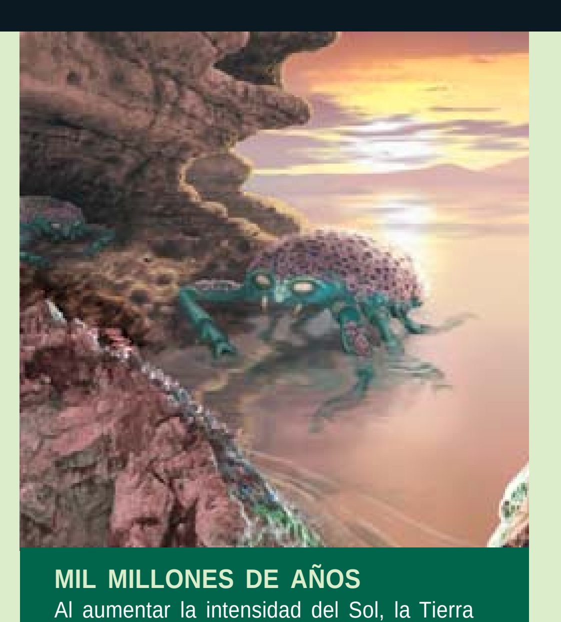
ARBOLES: Robles y arces, así como los invasores ailantos chinos, tomarían la ciudad de Nueva York.

MOSQUITOS: Al cesar las medidas insecticidas y reaparecer las zonas pantanosas, grandes nubes de insectos se alimentarían de otros animales.

GATOS DOMESTICOS SALVAJES: Probablemente medrarían en el mundo poshumano, donde comerían pequeños mamíferos y aves.



KENN BROWN (*arriba a la izquierda*); JEAN-FRANCOIS PODEVIN (*arriba a la derecha*); RUSSELL GLENISTER *image100/Corbis* (*gato*)



MIL MILLONES DE AÑOS
Al aumentar la intensidad del Sol, la Tierra se calentaría mucho, pero ciertos insectos, y algunos otros animales, podrían adaptarse.

CINCO MIL MILLONES DE AÑOS
La Tierra se vaporiza a medida que el agonizante Sol se dilata y consume los planetas cercanos.





UN BILLON DE AÑOS
Las emisiones de viejos programas de televisión, débiles y fragmentadas, seguirían propagándose por el espacio.

PAT RAWLINGS (*arriba a la izquierda*); RON MILLER (*arriba centro*); EVERETT COLLECTION (*arriba a la derecha*); PER-ERIC BERGLUND *Getty Images* (*rata*)

Y LOS QUE PERDERIAN...

Nuestros parásitos y el ganado nos echarían de menos. Esta es una lista de quienes probablemente sufrirían como resultado de nuestra desaparición.

GANADO: Se convertiría en pasto de leones, coyotes y otros depredadores.

RATAS: Privadas de nuestra basura, se morirían de hambre o se las comerían las aves de rapiña que anidasen en las ruinas.

CUCARACHAS: Sin edificios calentados que las ayudasen a superar el invierno, desaparecerían de las regiones templadas.

PIOJOS: Como están adaptados tan específicamente a los humanos, nuestra desaparición los extinguiría.

tamaño, que aprovecharían todos los nutrientes que contienen las especies boscosas. Y así acabarían apareciendo también depredadores mayores.

Pensar en una Tierra sin seres humanos puede tener beneficios prácticos. Weisman explica que su enfoque puede arrojar nueva luz sobre los problemas medioambientales.

No estoy sugiriendo que haya de preocuparnos que la especie pueda desaparecer de aquí a mañana. Reflexionar sobre lo que sucedería en nuestra ausencia es otra manera de ver qué sucede ahora que estamos presentes. Pensemos, por ejemplo, en cuánto tardarían en desaparecer algunas de nuestras creaciones. Ni siquiera sabemos pronosticar la longevidad de muchas de ellas (verbigracia, la de los contaminantes orgánicos permanentes que en su día fueron plaguicidas), la de sustancias químicas industriales o la de ciertos plásticos, tan importantes en nuestras vidas y que tanto abundan en el entorno. Casi ninguno de estos productos existía antes la Segunda Guerra Mundial. Cuesta no creer que ya no habrá forma de obtener resultado positivo alguno, que nos encontramos ante una oleada arrolladora, de dimensiones geológicas, que la especie humana ha descargado sobre la Tierra.

Pero podemos seguir formando parte del ecosistema manteniendo un mejor equilibrio con el resto del planeta. Y no me parece que tengamos que desaparecer de la Tierra para que vuelva a un estado más saludable.

El entrevistado

Alan Weisman enseña periodismo en la Universidad de Arizona.

Bibliografía complementaria

PLASTICS AND THE ENVIRONMENT. Dirigido por Anthony Andrady. John Wiley & Sons, 2003.

TWILIGHT OF THE MAMMOTHS: ICE AGE EXTINCTIONS AND THE REWILDING OF AMERICA. Paul S. Martin. University of California Press, 2005.

EXTINCTION: HOW LIFE ON EARTH NEARLY ENDED 250 MILLION YEARS AGO. Douglas H. Erwin. Princeton University Press, 2006.

THE REVENGE OF GAIA. James Lovelock. Allen Lane/Penguin Books, 2006.



1. LOS HURACANES FUTUROS podrían tornarse más poderosos por efecto del cambio climático.

OCEANOS MAS CALIDOS Y HURACANES MAS FUERTES

Crecen las pruebas de que el calentamiento global refuerza los vientos devastadores y lluvias torrenciales de los ciclones

Kevin E. Trenberth

El verano de 2004 fue un clarinazo de alarma: cuatro huracanes descomunales arrasaron Florida y diez tifones azotaron las tierras de Japón, cuatro más que los padecidos en el año anterior. Los científicos, asombrados, no se ponían de acuerdo en la explicación del fenómeno, especialmente en cuanto al papel del calentamiento global en tan inusitado aumento. Después vino la estación de 2005, que batió marcas en el Atlántico Norte con los devastadores huracanes Katrina y Rita. Pero en 2006, tras un fuerte aumento de las primas de seguro en el sudeste de EE.UU., el número de tormentas fue bastante menor de lo previsto. Si el calentamiento global era determinante, ¿por qué este súbito descenso?

El estudio minucioso de las pautas del clima está alcanzando una explicación consensuada de los crecimientos espectaculares de 2004 y 2005, así como del apaciguado 2006. Por desgracia, pronostica también problemas meteorológicos a largo plazo.

El huracán no es más, en un principio, que una perturbación atmosférica tropical susceptible de convertirse en un sistema organizado de tormentas eléctricas. Si el sistema comienza a girar y los vientos sobrepasan los 63 kilómetros hora, se le llama tormenta tropical; cuando la máxima velocidad del viento supera los 119 kilómetros hora, pasa a ser un ciclón tropical. Tales fenómenos se denominan "huracanes" en el Atlántico y nordeste del Pacífico, "tifones" en el noroeste del Pacífico y "ciclones" en el océano Indico. En el artículo utilizaremos esos términos indistintamente.

Para determinar si el calentamiento global repercute en el número, tamaño o intensidad (velocidad del viento) de los huracanes, ante todo es preciso entender cómo se generan. Al correr de los años se han ideado modelos cada vez más detallados. Los huracanes requieren aguas cálidas: en su mayoría se forman en los trópicos, donde los rayos solares caen, casi verticales, sobre el agua. El océano absorbe la mayor parte de la energía incidente y devuelve luego el exceso de calor, sobre todo por evaporación. Cuando la humedad llega a condensarse en lluvia, libera la energía latente y calienta la atmósfera. En invierno, los vientos transportan ese calor a latitudes más altas, desde donde puede radiar al espacio. Pero en el verano la energía asciende, por convección principalmente, hacia las capas superiores de la atmósfera tropical y crea allí fenómenos diversos, desde nubes cumuliformes hasta tormentas eléctricas. En circunstancias adecuadas, una serie de esas tormentas puede constituir un vórtice —un huracán—, que succionará enormes cantidades de calor del océano.

Para iniciar la formación de un vórtice se necesita una perturbación atmosférica previa. En el norte del

Conceptos básicos

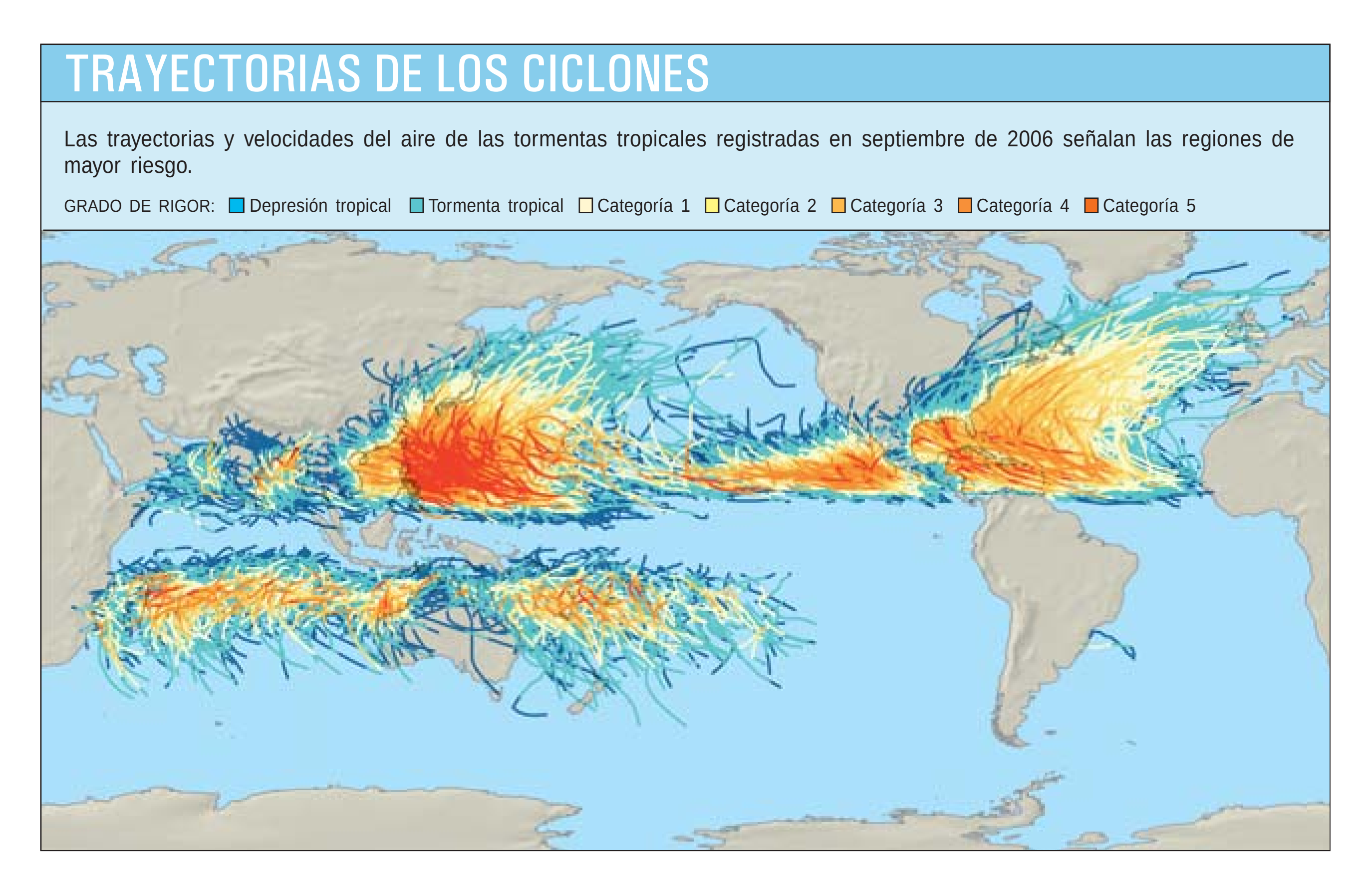
- El calentamiento global creado por la actividad humana eleva la temperatura de los océanos a la par que aumenta su evaporación. Ambos factores intensifican los huracanes.
- Basta un ligero aumento de la temperatura de la superficie del océano para tornar en huracanes un mayor número de tormentas tropicales o inyectar energía en una tormenta existente e incrementar las precipitaciones.
- No obstante, el número de huracanes de un año en concreto está muy condicionado por patrones oceánicos estacionales —El Niño y La Niña—; en 2006, sosegaron la actividad ciclónica en el Atlántico.

ALFRED T. KAMAJIAN

TRAYECTORIAS DE LOS CICLONES

Las trayectorias y velocidades del aire de las tormentas tropicales registradas en septiembre de 2006 señalan las regiones de mayor riesgo.

GRADO DE RIGOR: Depresión tropical · Tormenta tropical · Categoría 1 · Categoría 2 · Categoría 3 · Categoría 4 · Categoría 5



CARTOGRAFOS; FUENTES: ROBERT A. ROHDE; CENTRO NACIONAL DE HURACANES; JOINT TYPHOON WARNING CENTER

CLASIFICACION POR VELOCIDAD DEL VIENTO

CATEGORIAS DE HURACAN
(Escala Saffir-Simpson)

- 5 más de 250 km/h
- 4 210 a 249 km/h
- 3 178 a 209 km/h
- 2 154 a 177 km/h
- 1 119 a 153 km/h

TORMENTA TROPICAL

- 63 A 118 km/h

TROPICAL DEPRESSION

- 62 km/h o menos

UN CICLON TROPICAL SE LLAMA...

Huracán en el Atlántico y en el nordeste y sur del Pacífico

Tifón en el noroeste del Pacífico

Ciclón en el océano Indico y región de Australia

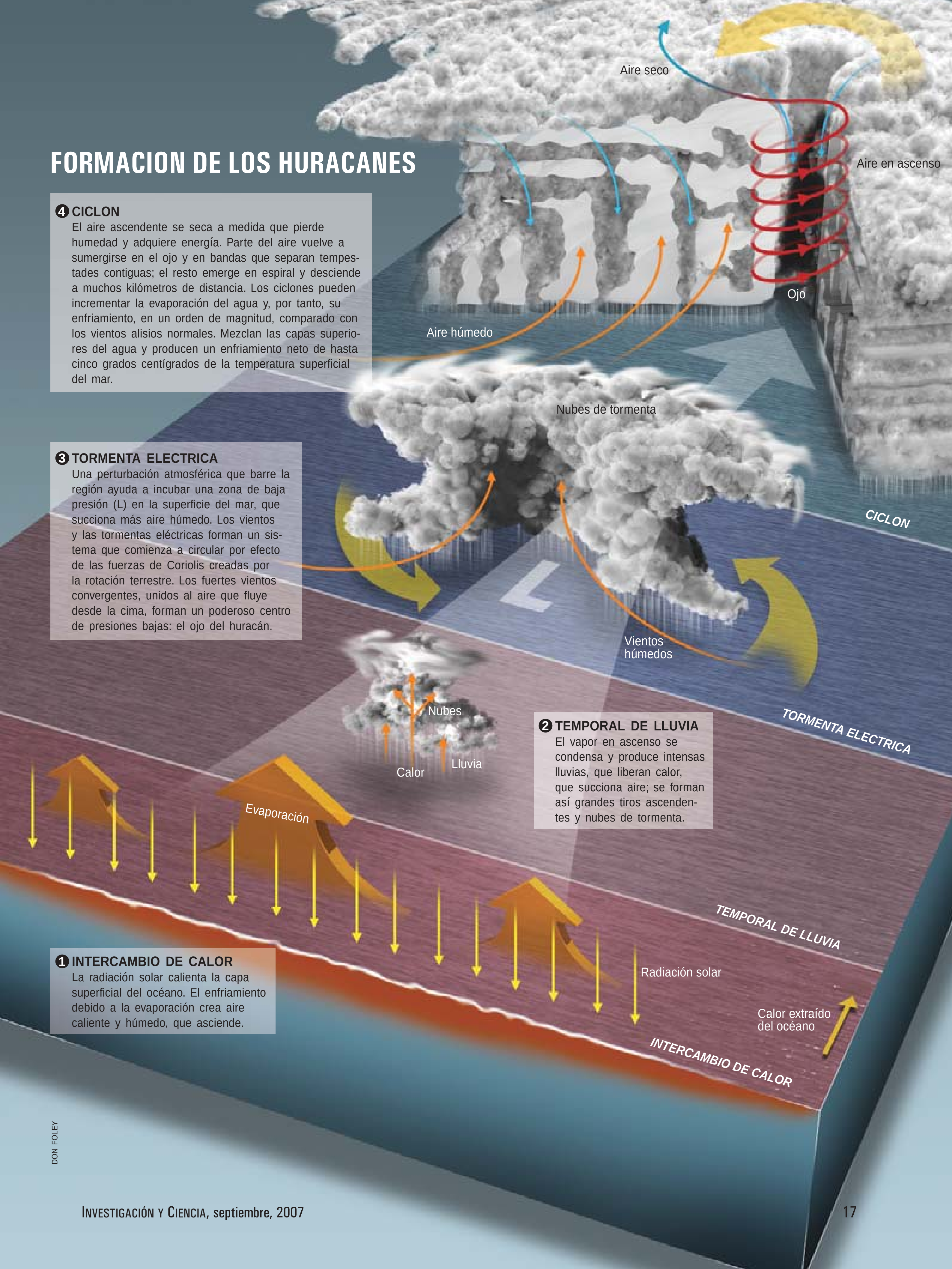
Atlántico, tales alteraciones suelen provenir de la costa occidental centroafricana; allí se crean a menudo por el contraste de temperaturas entre los ardientes desiertos interiores y las arboladas regiones montañosas de la costa. También deben darse otras condiciones favorables: más de 26 grados en la superficie del mar, abundante vapor de agua, baja presión sobre el océano y débil variación (gradiente) de la velocidad del viento entre pequeñas y grandes alturas (una fuerte variación tiende a fraccionar un vórtice incipiente).

Dado que la temperatura de la superficie del mar es un factor clave en la formación de huracanes, quienes investigan los fenómenos recientes deseaban conocer su variación durante las últimas décadas y si con ella no habrían cambiado también el número, la extensión y la intensidad de los huracanes. Si así fuera, ¿tendría gran incidencia el calentamiento global, creado como sabemos por las actividades humanas? ¿Qué condiciones especiales había en 2004 y 2005 para que esos años batieran marcas?

Desde hace tiempo sabemos que el aumento de los gases de invernadero (como el dióxido de carbono emitido por la quema de combustibles fósiles) calienta el planeta y puede elevar la temperatura superficial de los mares. Se produce también más vapor de agua y, por tanto, resultan más probables los procesos convectivos que dan lugar a los huracanes. Después de 2005, cabe preguntarse si ya han crecido realmente las temperaturas superficiales del mar y en qué medida ha contribuido a ello el calentamiento global.

Un campo de incubación más cálido

No se sabe con certeza cuántos huracanes hubo en el mundo antes de 1970; sólo a partir de ese año se regularizaron las observaciones por satélite. Sí se consideran fiables los datos que se tomaron desde el aire, a partir de 1944, de las tormentas de la zona tropical del norte del Atlántico. Repasando los registros, se aprecia que el número de tales tormentas y huracanes ha crecido desde 1994, y que el aumento ha coincidido en muy buena medida con el ascenso de las temperaturas del mar entre los 10 y 20 grados de latitud Norte. Esta banda de aguas tropicales, justo al norte del ecuador, se extiende desde Africa hasta América Central. En ella se forman los huracanes.



FORMACION DE LOS HURACANES
❹ CICLON
El aire ascendente se seca a medida que pierde humedad y adquiere energía. Parte del aire vuelve a sumergirse en el ojo y en bandas que separan tempestades contiguas; el resto emerge en espiral y desciende a muchos kilómetros de distancia. Los ciclones pueden incrementar la evaporación del agua y, por tanto, su enfriamiento, en un orden de magnitud, comparado con los vientos alisios normales. Mezclan las capas superiores del agua y producen un enfriamiento neto de hasta cinco grados centígrados de la temperatura superficial del mar.
❸ TORMENTA ELECTRICA
Una perturbación atmosférica que barre la región ayuda a incubar una zona de baja presión (L) en la superficie del mar, que succiona más aire húmedo. Los vientos y las tormentas eléctricas forman un sistema que comienza a circular por efecto de las fuerzas de Coriolis creadas por la rotación terrestre. Los fuertes vientos convergentes, unidos al aire que fluye desde la cima, forman un poderoso centro de presiones bajas: el ojo del huracán.
❷ TEMPORAL DE LLUVIA
El vapor en ascenso se condensa y produce intensas lluvias, que liberan calor, que succiona aire; se forman así grandes tiros ascendentes y nubes de tormenta.
❶ INTERCAMBIO DE CALOR
La radiación solar calienta la capa superficial del océano. El enfriamiento debido a la evaporación crea aire caliente y húmedo, que asciende.
Aire seco
Aire en ascenso
Ojo
Aire húmedo
Nubes de tormenta
CICLON
L
Vientos húmedos
TORMENTA ELECTRICA
Nubes
Calor
Lluvia
Evaporación
TEMPORAL DE LLUVIA
Radiación solar
Calor extraído del océano
INTERCAMBIO DE CALOR
DON FOLEY

Según algunos, la elevación de las temperaturas marinas en el norte del Atlántico refleja la oscilación multidecenal atlántica, un ciclo natural durante el cual las temperaturas marinas se mantienen más bajas en el transcurso de varios decenios, para crecer luego en los decenios siguientes, tras lo cual vuelven a descender (la máxima diferencia de temperaturas es del orden de 0,5 grados Celsius). Se cree que esta oscilación es resultado de un cambio en las corrientes oceánicas —como las del Golfo, que atraviesan el Atlántico— y de la mayor profundidad de las corrientes de retorno.

Desde los años setenta hasta los primeros noventa, las temperaturas superficiales del norte del Atlántico fueron bajas. A partir de entonces, la oscilación multidecenal ha calentado esas aguas y se han formado más huracanes que durante la fase fría. Sin embargo, los modelos informáticos indican que ese ciclo no puede por sí solo explicar la tendencia ascendente desde 1995 ni lo que ocurrió en 2005 y 2006.

Aunque la humanidad esté realizando un experimento gigantesco e incontrolado con la emisión de gases de invernadero a la atmósfera en cantidades notables, los climatólogos no pueden efectuar experimentos que alteren la Tierra real. Por eso recurren a modelos climáticos para deslindar los procesos físicos, químicos y biológicos que afectan al clima. Tras largos años de trabajo, el Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas en Boulder, Colorado, y otros laboratorios han ideado modelos globales del clima que reproducen con razonable precisión las temperaturas reales del aire y de la superficie del mar a escala mundial durante el siglo pasado. Las simulaciones tienen en cuenta los cambios en la composición química de la atmósfera, la energía emitida por el Sol y aquellas circunstancias que, como las grandes erupciones volcánicas, puedan bloquear la radiación solar en grado suficiente para enfriar el planeta durante uno o dos años.

Gracias a los modelos, es posible separar los cambios impuestos por los seres humanos —el humo o la polución vertidos a la atmósfera— y evaluar sus consecuencias. Al hacerlo se aprecia que se ha producido un calentamiento del Atlántico superior al que pudiera achacarse a la oscilación multidecenal y que ese calentamiento adicional guarda relación con el calentamiento antropogénico de la atmósfera. Un estudio reciente, de Ben Santer y sus colaboradores, del Laboratorio Nacional Lawrence en Livermore, va más allá. Concluye que el calentamiento tropical, tanto del Atlántico como del Pacífico tropicales, es imputable al aumento de los gases de invernadero antropogénicos. Las estimaciones más aceptadas indican que las temperaturas superficiales del mar han subido en torno a 0,6 grados Celsius en todo el globo por efecto del cambio climático, en especial desde 1970. Aunque la cifra pueda parecer pequeña, no se necesita mucho más para desencadenar potentes tormentas: mientras el huracán Katrina recorría el golfo de México, bastaba con que subiera o bajara un grado la temperatura superficial del mar para que la intensidad de la tormenta cambiase de categoría (de 2 a 3, por ejemplo).

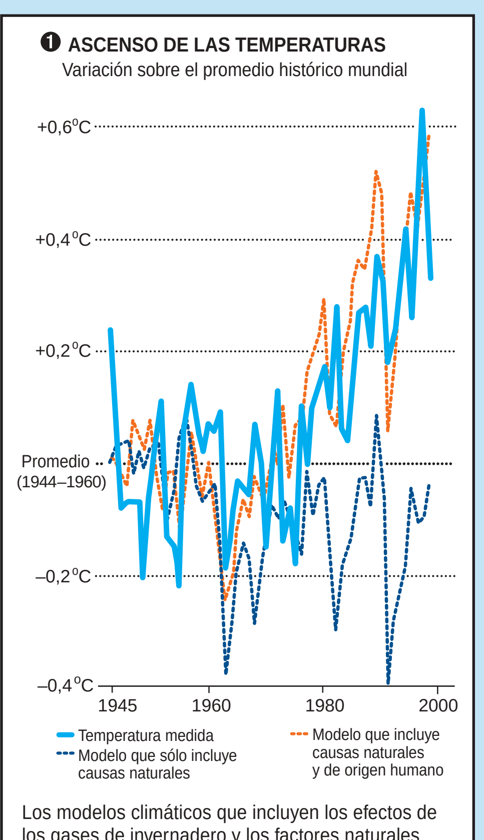
Como la actividad tropical del ciclón depende de las temperaturas marinas, debemos inferir que el calentamiento global ha provocado tormentas más intensas. Publiqué una detallada justificación de ese vínculo en junio de 2005 en *Science*, y sólo dos meses después Kerry Emmanuel, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, dio a conocer en *Nature* pruebas sacadas directamente de la observación. Demostraba que, desde 1970, existe una estrecha relación entre el ascenso de las temperaturas del mar y notables incrementos de intensidad y duración de los ciclones en el mundo entero.

Las críticas de otros expertos han hecho que se revisen parcialmente ciertas correlaciones, pero no alteran

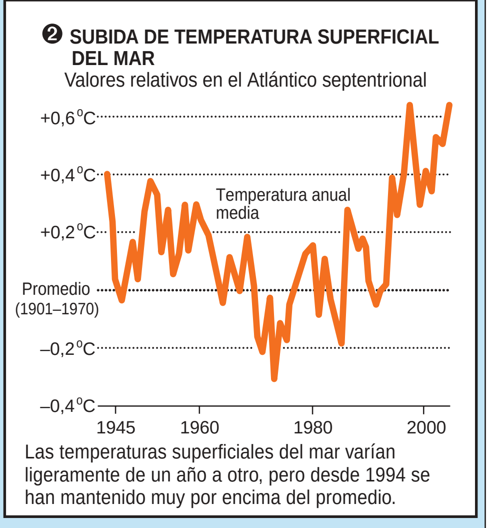
CAUSA Y EFECTO

El calentamiento global exacerba las tormentas

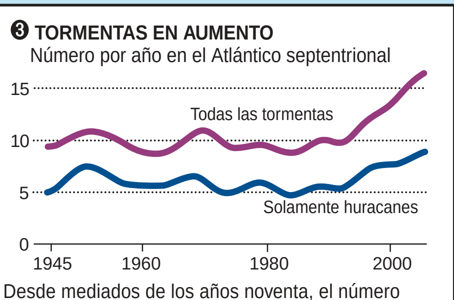
Al elevarse la temperatura terrestre por las actividades humanas ❶, las temperaturas superficiales del mar aumentan ❷ y provocan más huracanes en el norte del Atlántico ❸.



Los modelos climáticos que incluyen los efectos de los gases de invernadero y los factores naturales (luz solar, volcanismo) concuerdan con los cambios de temperatura medidos a partir de 1970 mejor que los modelos basados sólo en causas naturales.



Las temperaturas superficiales del mar varían ligeramente de un año a otro, pero desde 1994 se han mantenido muy por encima del promedio.



Desde mediados de los años noventa, el número de tormentas tropicales y huracanes en el Atlántico Norte se ha mantenido alto. (La observación aérea de las tormentas empezó en 1944.)

JEN CHRISTIANSEN; FUENTES: KEVIN E. TRENBERTH Y GERALD MEEHL *NCAR* (*gráficas*)

la conclusión general. En septiembre de 2005, Peter Webster, del Instituto de Tecnología de Georgia, y sus colaboradores escribieron un artículo en *Science* donde se mostraba explícitamente un aumento sustancial del número de huracanes de categorías 4 y 5 a partir de 1970, así como del porcentaje total de huracanes de ese tipo. Su conclusión era que cabía esperar el aumento en cuestión, habida cuenta del incremento observado en las temperaturas del mar.



2. GRETNA, Luisiana, en las afueras de Nueva Orleáns, fue alcanzada por el huracán Katrina.

RICK WILKING *Reuters/Corbis*

¿Por qué vino la calma?

La cifra récord de huracanes registrados en 2004 y 2005 también se ajustaba a esas conclusiones. Pero, en tal caso, ¿por qué fue tan calmada la estación de 2006? Durante el verano de 2005, las temperaturas superficiales del mar en la zona tropical del Atlántico septentrional (de 10 a 20 grados de latitud Norte) alcanzaron niveles máximos: 0,92 grados por encima de lo que fue normal entre 1901 y 1970. Más de lo que podría achacarse a la acción conjunta de la oscilación multidecenal y el calentamiento global. Una fuerza había actuado durante el invierno y la primavera anteriores: El Niño, calentamiento del océano Pacífico tropical que ocurre cuando se acoplan las corrientes oceánicas y atmosféricas.

En el invierno de 2004 a 2005, El Niño avanzaba por el hemisferio norte, con intensidad de débil a moderada. Provocaba cielos soleados y vientos flojos en el Atlántico tropical, lo que comportaba un menor enfriamiento por evaporación; se calcula que así el océano se calentó unos 0,2 grados. Pero El Niño se agotó hacia el verano, reduciendo al mínimo los gradientes de velocidad del viento en el Atlántico, lo cual creó nuevas condiciones favorables para la formación de huracanes. De ese modo, en 2005 el resultado final fue que El Niño —añadido a la oscilación multidecenal y al calentamiento global— hiciese que se formara un número nunca visto de huracanes y que crecieran de manera inusitada.

En contraste, fue La Niña —fenómeno caracterizado por el enfriamiento del Pacífico tropical— la que se impuso durante el invierno de 2005 a 2006, creando vientos alisios en el norte del Atlántico, mucho más fuertes de lo habitual, que extrajeron calor del océano. Para la estación tormentosa de 2006, las temperaturas superficiales del mar quedaron un poco inferiores o casi iguales a las normales. Además, durante el verano de 2006 se empezó a formar de nuevo El Niño, lo que contribuyó a aumentar el gradiente de velocidad del viento en el Atlántico. Ambos factores modificaron fundamentalmente las condiciones del Atlántico tropical, de una estación de temibles borrascas en 2005 a una estación calmada en 2006. Aunque ahora se tienen en general unas temperaturas superficiales del mar mayores, las variaciones anuales que se superponen a ese trasfondo pueden predominar en un determinado año.

Y más inundaciones

Ni que decir tiene, estas conclusiones no son más fiables que las observaciones y modelos de donde proceden. En el Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas utilizamos un modelo al que llamamos Investigación y Predicción del Clima, que fragmenta los datos climáticos reales en una retícula con nodos espaciados de cuatro en cuatro kilómetros. Según casi todos los criterios, se trata de alta resolución (las simulaciones globales del Servicio Meteorológico Nacional de Estados Unidos dan una resolución de 35 kilómetros; los modelos regionales, de 12 a 8 kilómetros). Para conseguir una resolución de cuatro kilómetros, se requiere una gran potencia de computación y tiempos de ejecución largos; los meteorólogos han de limitarse a retículas de ocho kilómetros para hacer sus predicciones a tiempo. Nuestros modelos calculan directamente los efectos de la convección.

Nuestra confianza en los modelos se halla justificada. Al introducir en ellos datos auténticos se reproducen muy bien las características de las tormentas reales, en especial los trayectos de las tormentas y huracanes desencadenados en 2004 y 2005. Cuando cargamos en el ordenador

LOS PEORES CICLONES

Por pérdidas económicas:
Katrina, costa del Golfo, en 2005; daños por más de 100.000 millones de dólares

Por mortandad:
Bhola, delta del Ganges, en 1970; más de 300.000 muertos

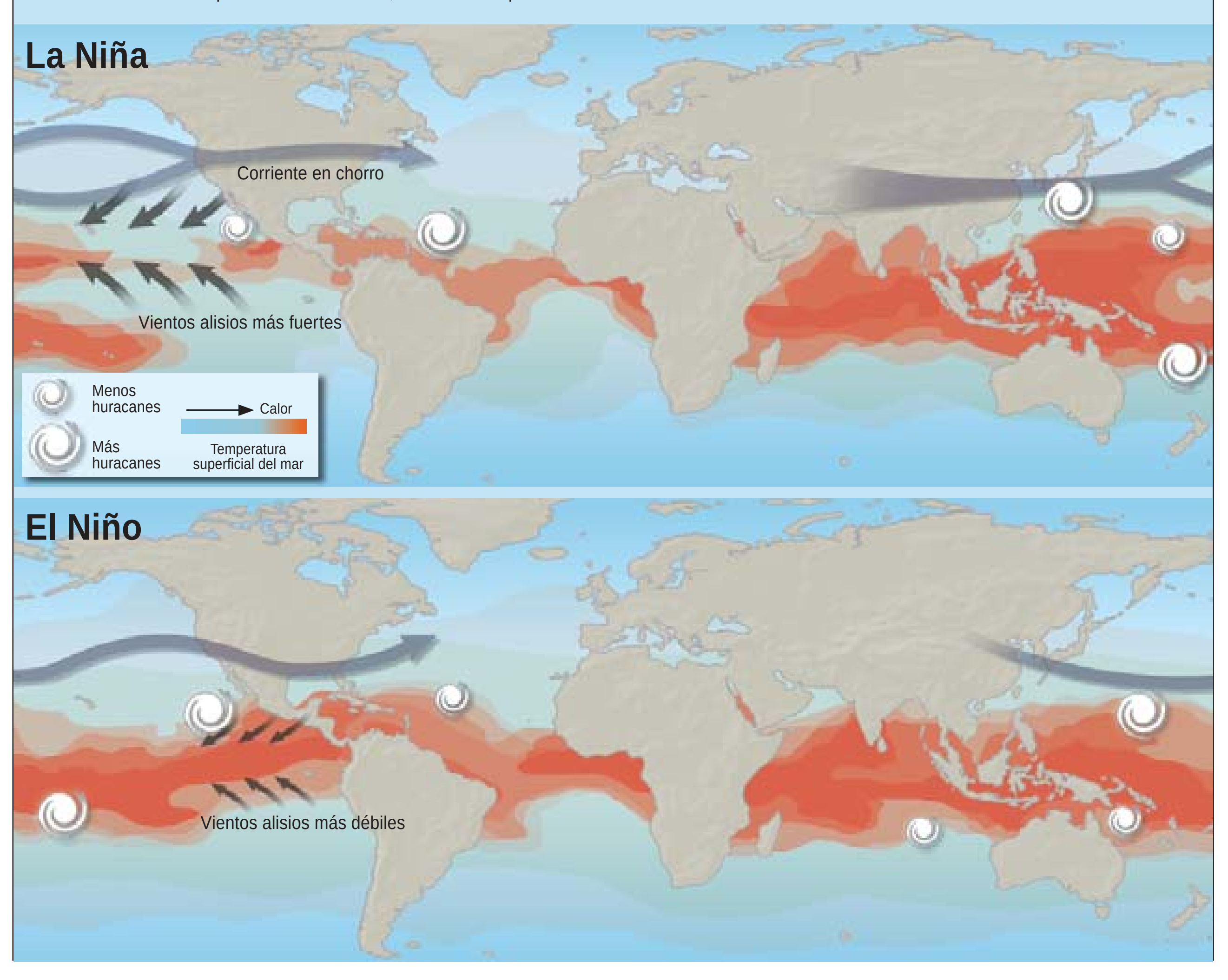
Por recalada más intensa:
Camille, Costa del Golfo, en 1969; máxima velocidad sostenida del viento, 300 km/h

Por mayor duración:
John, océano Pacífico, en 1994; 31 días de duración

Por mayor radio de acción:
Tip, océano Pacífico, en 1979; 2200 km de extensión

EXPLICACION DE LA CALMA DE 2006

Pese al calentamiento de los mares, los acoplamientos transitorios entre atmósfera y océanos pueden influir en el número de huracanes que se forman en un determinado año. Si La Niña (enfriamiento del Pacífico) ocurre en el invierno y primavera del hemisferio norte, los vientos alisios del Pacífico oriental serán más fuertes de lo normal y extraerán calor del océano, disminuyendo allá la energía potencial para tormentas. Pero el fenómeno divide en dos la corriente en chorro del Pacífico y mantiene al norte la porción del Atlántico, de manera que los huracanes formados en las costas de Africa avanzan en sentido oeste, hacia el Caribe. Esto explica en parte que la temporada de huracanes fuese allí extrema en 2005. Si se desarrolla El Niño (calentamiento del Pacífico) durante la primavera y el verano, la corriente en chorro descenderá en dirección sur, sobre Norteamérica; se creará así un gradiente de velocidad del viento más intenso, que deshará las tormentas nacientes que intenten organizarse en el Atlántico. Tales condiciones redujeron el número de huracanes en 2006.



CARTOGRAFOS ESPECIALISTAS

las temperaturas marinas tomadas en los días que Katrina recorría el golfo de México, el huracán simulado siguió muy de cerca el rastro del auténtico.

Tranquilizados por los resultados, intentamos además determinar cómo influía la subida de las temperaturas del mar en el volumen de lluvia de los huracanes. En el caso de Katrina, un grado más en esas temperaturas elevaba en torno al 7 por ciento el vapor de agua en la atmósfera ambiente. También aumentaba la fuerza máxima de los vientos, con lo que transportaban más humedad a la tormenta y favorecían la evaporación. En conjunto, esa elevación de un grado incrementaba las precipitaciones en un 19 por ciento dentro de un radio de 400 kilómetros desde el ojo del huracán del modelo.

Es justo, pues, afirmar que el calentamiento global aumenta las precipitaciones asociadas a un ciclón. La subida de 0,6 grados en las temperaturas superficiales del mar, registrada desde 1970 como efecto del calentamiento global, significa que el contenido de vapor de agua en la atmósfera ha crecido un 4 por ciento en los últimos 37 años. En línea con tales hallazgos, los detectores de microondas instalados a bordo de satélites han observado un ascenso real del 2 por ciento sólo desde 1988. Recordemos que en un ciclón el vapor de agua añadido se condensa y cede el calor latente, de modo que asciende un mayor volumen de aire y por tanto afluyen más vientos, en cantidad comparable. El 4 por ciento incremental de vapor de agua puede producir un 8 por ciento más de precipitaciones.

En tales cálculos nos apoyamos para sostener que, de los 30 centímetros (300 litros por metro cuadrado) de lluvia que volcó el Katrina sobre Nueva Orleáns, alrededor de 2,5 centímetros (un 8 por ciento) cabe atribuírselos al calentamiento global. No se puede proclamar que un ciclón determinado haya sido "causado" por el calentamiento del planeta, pero no cabe duda de que éste influye en la fuerza de las tormentas y en la precipitación asociada.

Problemas que se avecinan

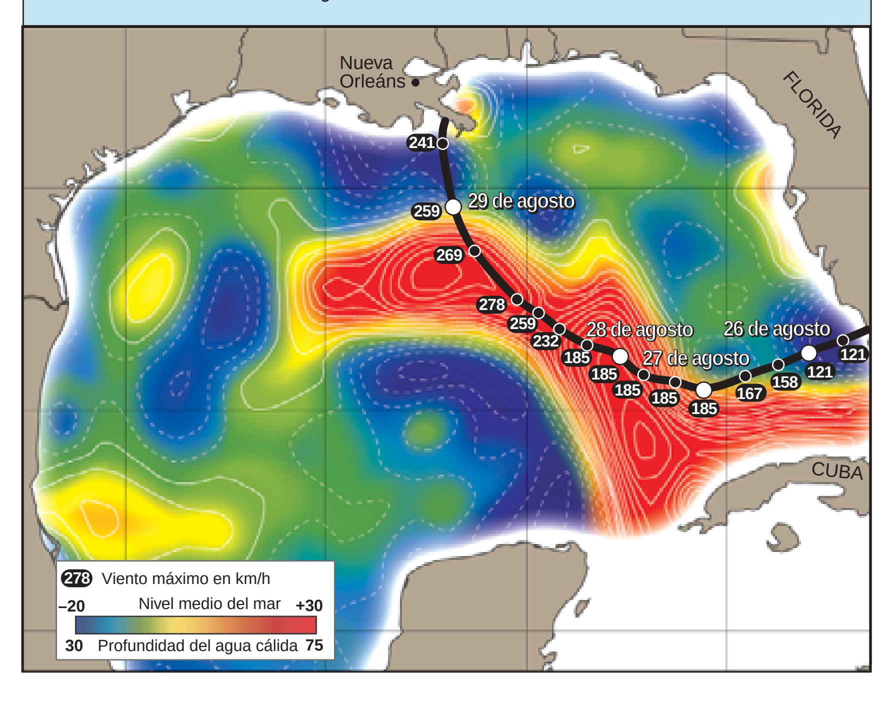
Tanto las observaciones como las teorías sugieren que los huracanes se intensifican a medida que la Tierra se calienta. Sin embargo, es difícil predecir si va a aumentar el número absoluto de ciclones, dado que las tormentas tropicales extraen mucho más calor del océano que las tempestades de intensidad media. Una tormenta fuerte puede causar mayores efectos que dos más débiles; es posible y hasta probable que se formen menos ciclones, pero serán mayores y más intensos. Una fuerte tormenta, ya pasada, deja tras sí un océano más frío y hace menos probable la creación de nuevas borrascas, al menos inmediatamente.

Se cuestionan los datos tomados de anteriores observaciones de tormentas. Algunos afirman que los datos históricos no guardan suficiente coherencia para llegar a conclusiones firmes. Otros, que los datos para el Atlántico septentrional son fiables (desde 1944, por lo menos), aunque menos seguros para el Pacífico. Resultaría útil reprocesar mediante técnicas modernas todos los datos vía satélite almacenados en archivos; se reuniría así una información más coherente sobre la intensidad, amplitud, duración y otros parámetros de actividad de las tormentas anteriores. Con ordenadores más rápidos se logrará perfeccionar los modelos, y los conocimientos se enriquecerán a través de experiencias de campo más amplias. Estos avances permitirán calibrar mejor la calidad de los modelos y su credibilidad con miras al futuro.

Pese a todo, los registros científicos, cada vez más fiables, indican que el calentamiento global está elevando las temperaturas superficiales del mar. Aumento que, a su vez, intensificará probablemente los huracanes. En su informe de mayo, el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático concluía que "se observan indicios de un incremento de la actividad de los ciclones tropicales en el Atlántico Norte desde 1970, relacionado con aumentos de la temperatura superficial del mar en zonas tropicales". Al tiempo que perfeccionamos nuestros modelos y observaciones, convendrá precavernos contra huracanes más violentos.

LOS MARES CALIDOS CREAN TORMENTAS

El ciclón remueve y mezcla las capas superiores del océano, hasta los 100 metros de profundidad. Tras atravesar Florida el 26 de agosto de 2005, el huracán Katrina apenas pasaba de la Categoría 1. Pero entonces se asoció a una profunda masa de agua cálida, la corriente de lazo (*rojo*); el nivel del mar era allí más alto y la mezcla de las capas de agua ofrecía un enorme almacén de energía. El Katrina pasó en menos de tres días a la Categoría 5.



CARTOGRAFOS ESPECIALISTAS FUENTE: UNIVERSIDAD DE COLORADO EN BOULDER

El autor

Kevin E. Trenberth dirige la Sección de Análisis Climático del Centro Nacional de Investigación Atmosférica en Boulder. Su trabajo se centra en los ciclos de la energía y del agua en el sistema climático. Es uno de los redactores y coordinadores del último informe, el de 2007, del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático. También ha ocupado puestos destacados en el Programa Mundial de Investigación del Clima, consorcio de organismos internacionales, bajo los auspicios de las Naciones Unidas, radicado en Ginebra.

Bibliografía complementaria

DIVINE WIND. THE HISTORY AND SCIENCE OF HURRICANES. Kerry Emanuel. Oxford University Press, 2005.

INCREASING DESTRUCTIVENESS OF TROPICAL CYCLONES OVER THE PAST 30 YEARS. Kerry Emanuel en *Nature*, vol. 436, págs. 686-688; 4 de agosto, 2005.

CHANGES IN TROPICAL CYCLONE NUMBER, DURATION AND INTENSITY IN A WARMING ENVIRONMENT. P. J. Webster, G. J. Holland, J. A. Curry y H.-R. Chang en *Science*, vol. 309, págs. 1844-1846; 16 de septiembre, 2005.

ATLANTIC HURRICANES AND NATURAL VARIABILITY IN 2005. Kevin E. Trenberth y Dennis J. Shea en *Geophysical Research Letters*, vol. 33, n.º 12; junio de 2006.

El código de

Cada vez nos hallamos más cerca de desentrañar el código de la memoria, que podría aplicarse al diseño de ordenadores y robots más potentes

Conceptos básicos

- La representación y formación de recuerdos en el cerebro se funda en la acción concertada de extensas poblaciones de neuronas.
- En el hipocampo del ratón (región crítica para la formación de recuerdos) existen agrupaciones neuronales que responden a distintos aspectos de un suceso. Se las denomina coloquialmente "cliques". Algunas de esas agrupaciones representan informaciones abstractas y generales; otras señalan cualidades más específicas.
- El cerebro podría aplicar la misma organización jerárquica que opera en la fijación de recuerdos para convertir series de impulsos eléctricos en percepciones, conocimientos y conductas. Se trataría de un código neural universal, un conjunto de reglas de que se valdría el cerebro para identificar y organizar las experiencias somáticas.
- Se han traducido en código binario registros de la actividad de agrupaciones neuronales. Tal digitización de señales cerebrales podría sentar las bases de un libro de claves de la mente: un instrumento de catalogación de pensamientos y experiencias, que se compararían luego entre individuos y quizás entre especies.

Joe Z. Tsien



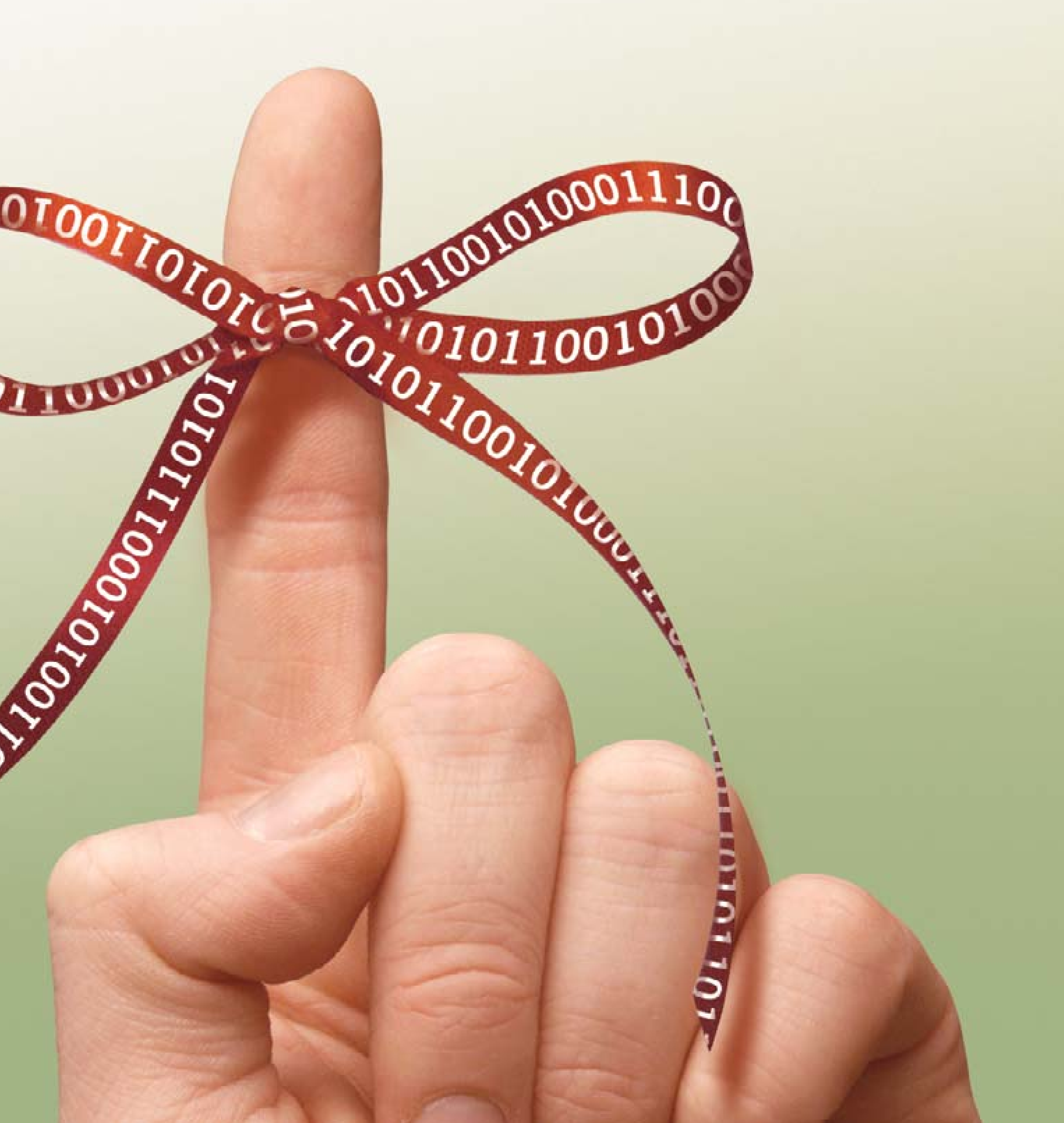
Quienes han sufrido un terremoto conservan vívidos recuerdos. El suelo, sacudido, tiembla, se pandea y fractura; el aire se llena de horrísonos retumbos y crujidos, de vidrios que se rompen en añicos; los armarios y alacenas se abren de golpe; caen de los estantes libros, platos y toda clase de objetos. Recordamos tales sucesos durante años —y con una nitidez impresionante— porque nuestro cerebro ha evolucionado para hacer precisamente eso: extraer información de hechos sobresalientes y utilizar tales saberes en el futuro como guía de respuesta ante situaciones parejas. Semejante capacidad para aprender de la experiencia les permite a los animales adaptarse a un mundo complejo que cambia sin cesar.

La neurociencia lleva decenios esforzándose en desentrañar el proceso de formación de los recuerdos. Ahora, merced a la conjunción de nuevos experimentos, análisis matemáticos de gran potencia y el registro simultáneo de la actividad de más de 200 neuronas en ratones despiertos, hemos descubierto lo que parece ser el mecanismo que utiliza el cerebro para extraer información vital de sus experiencias y transformarla en recuerdo. Nuestros resultados se suman a un creciente cuerpo de trabajos que indican que no basta un flujo lineal de señales desde una neurona hacia otra para explicar la representación cerebral de las percepciones y los recuerdos [*véase* "En busca del código neural", por Miguel A. L. Nicolelis y Sidarta Ribeiro; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA; febrero de 2007]. Muy al contrario, es necesaria la actividad coordinada de nutridas poblaciones neuronales.

Nuestros estudios sugieren, además, que las poblaciones neuronales que participan en la codificación de recuerdos extraen también la clase de conceptos generales que nos permiten transformar las

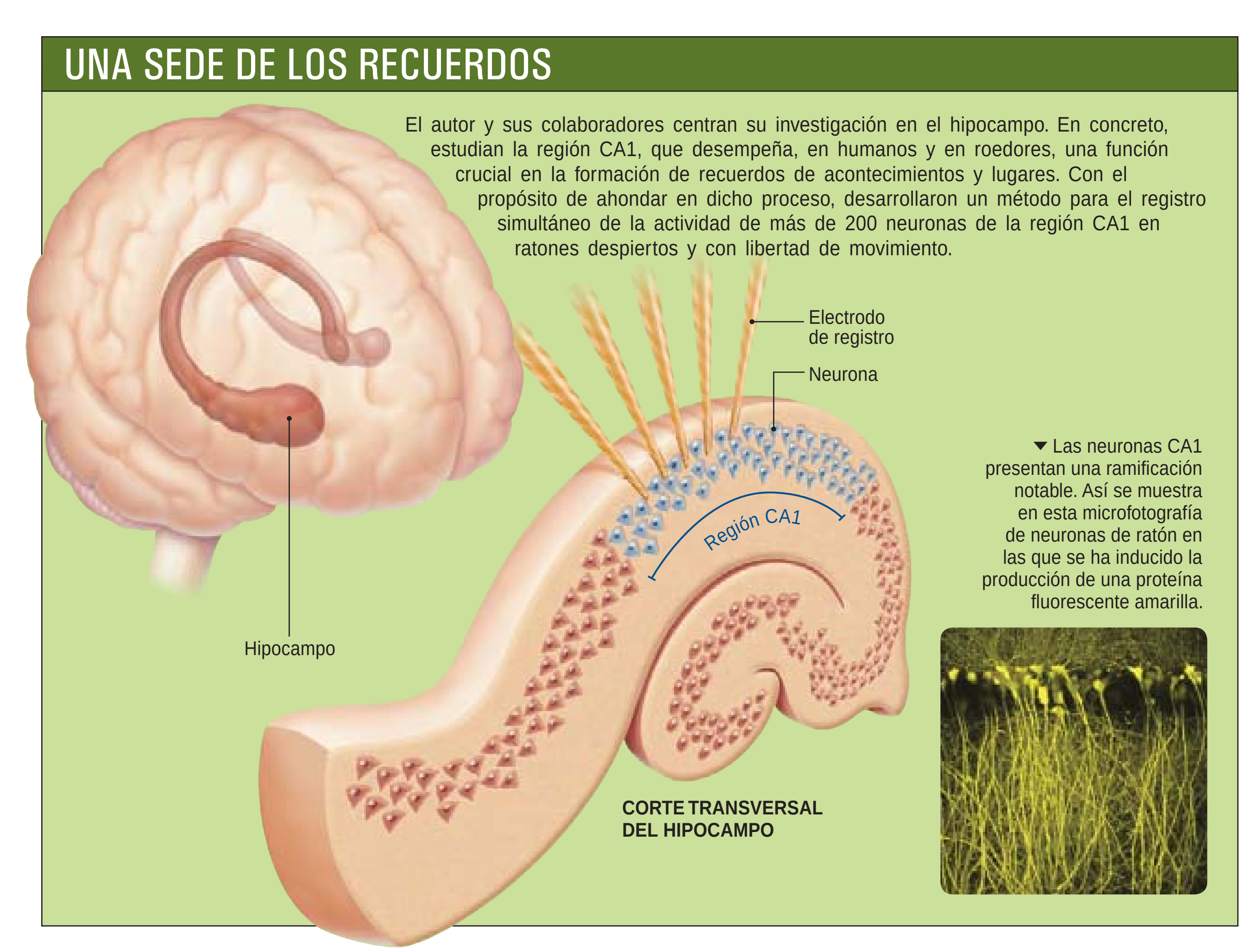

TOM DRAPER DESIGN; IMAGESHOP/CORBIS (*fotografía*)

la memoria



UNA SEDE DE LOS RECUERDOS

El autor y sus colaboradores centran su investigación en el hipocampo. En concreto, estudian la región CA1, que desempeña, en humanos y en roedores, una función crucial en la formación de recuerdos de acontecimientos y lugares. Con el propósito de ahondar en dicho proceso, desarrollaron un método para el registro simultáneo de la actividad de más de 200 neuronas de la región CA1 en ratones despiertos y con libertad de movimiento.



▼ Las neuronas CA1 presentan una ramificación notable. Así se muestra en esta microfotografía de neuronas de ratón en las que se ha inducido la producción de una proteína fluorescente amarilla.

experiencias cotidianas en conocimiento. Esos hallazgos nos acercan a un posible código neural universal, es decir, las reglas a que se atiene el cerebro para convertir conjuntos de impulsos eléctricos en percepciones, recuerdos, conocimientos y, en última instancia, conductas. La comprensión de ese código se aplicaría al desarrollo de interfaces más integradas entre cerebros y máquinas, al diseño de una nueva generación de computadoras y robots inteligentes y, quién sabe, si a la compilación de un "libro de claves" de la mente, que permitiera "leer", mediante el rastreo de la actividad neuronal, lo que alguien recuerda o piensa.

Ratones expertos

Nuestras investigaciones sobre el código cerebral derivan de otros trabajos centrados en las bases moleculares del aprendizaje y la memoria. En otoño de 1999 creamos, mediante ingeniería genética, un linaje de ratones dotados de una memoria excepcional [*véase* "Ratones expertos" por Joe Z. Tien; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 2000]. Esos "ratoncitos sabios" —a los que llamamos Doogie— aprendían con mayor prontitud y recordaban durante más tiempo que los ratones salvajes. El trabajo suscitó bastante interés y debate; la revista *Time* le dedicó una portada. Pero, a raíz de esos descubrimientos, me planteé otra pregunta: ¿Qué es, exactamente, un recuerdo?

Se sabía que la conversión de experiencias perceptivas en recuerdos duraderos requiere la intervención del hipocampo. Se conocían incluso las moléculas que protagonizan tal proceso: por ejemplo, el receptor NMDA (de N-metil-D-aspartato), que se alteró para la obtención de Doogie. Se desconocía, sin embargo, el modo en que se representa un recuerdo mediante la activación de células nerviosas. Hace algunos años me planteé la posibilidad de dar con una descripción matemática o fisiológica del recuerdo. ¿Lograríamos identificar la dinámica de las redes neurales y patentizar el patrón de actividad que acontece durante la formación de un recuerdo? ¿Podríamos discernir los principios organizativos que siguen las poblaciones neuronales para la selección y el registro de los aspectos centrales de una experiencia?

Antes de ahondar en el código neural de la memoria, debíamos mejorar los métodos para el seguimiento de la actividad cerebral. Pensábamos seguir trabajando con ratones: en parte, ese modelo animal nos permitiría realizar, llegado el caso, experimentos con un mamífero dotado de unas capacidades de aprendizaje y recordación modificadas genéticamente (como Doogie) y con ratones mutantes con déficits mnémicos.

Otros investigadores habían supervisado la actividad de grupos de centenares de neuronas en monos despiertos; en ratones, en cambio, nunca se habían registrado más de 20 o 30 neuronas a la vez, debido, sobre todo, a que el cerebro del múrido es del tamaño de un cacahuete. Con Longlian Nin desarrollé un dispositivo que registraba la actividad de

ALICE Y. CHEN (*ilustraciones*); M. FUHRMANN Y JOCHEM HERMS *Centro de Investigación de Neuropatología y Priones, Universidad Ludwig Maximilians de Múnich (micrografía)*

un gran número de neuronas individuales en un ratón despierto y con libertad de comportamiento.

A continuación, diseñamos experimentos para sacar provecho de lo que mejor hace el cerebro: fijar recuerdos de sucesos impresionantes, que ejercen una influencia profunda y duradera en la vida. Los atentados del 11 de septiembre en Nueva York, un terremoto o la caída libre de 100 metros de desnivel que puede experimentarse en un parque de atracciones, son de difícil olvido.

Ideamos pruebas que remedasen ese tipo de sucesos episódicos de intensa carga emotiva. Tales experiencias habrían de producir recuerdos duraderos y tenaces. Suponíamos que en la codificación de tales recuerdos intervendría un gran número de neuronas del hipocampo, lo que haría más probable encontrar células activadas por la experiencia y poder así recopilar datos suficientes para extraer los patrones y principios organizativos que rigen el proceso.

Entre los episodios espeluznantes que elegimos había un terremoto (simulado mediante la sacudida del recipiente donde se alojaba el ratón), un chorro repentino de aire en el lomo del animal (que remedaba el ataque en picado de una lechuza) y una corta caída libre en el interior de un "ascensor" (simulada mediante un bote de galletas que teníamos en el laboratorio). Cada animal hubo de pasar por siete episodios de cada suceso, con descansos intermedios de varias horas. Durante los episodios "de impacto" y en los descansos se registró la actividad individual de hasta 260 neuronas de la región CA1 del hipocampo, que en humanos y animales resulta clave para la formación de recuerdos.

Recuerdo de experiencias impactantes

Tras la recolección de datos, nuestra primera preocupación consistió en detectar las posibles regularidades correspondientes a la codificación de recuerdos de esos acontecimientos espeluznantes. Con mi colaborador Remus Osan analicé los registros valiéndonos de poderosos métodos de reconocimiento de patrones, en concreto de análisis múltiple-discriminante (AMD). Ese método matemático proyecta sobre un espacio gráfico tridimensional lo que correspondería a un problema de un gran número de dimensiones. (Por ejemplo, la actividad de 260 neuronas previa y posterior a un suceso supondría la consideración de 520 dimensiones.) Los tres ejes de la proyección gráfica no corresponden a medidas tangibles de la actividad neuronal: cartografían un subespacio matemático capaz de discriminar patrones generados por acontecimientos distintos.

Cuando proyectamos sobre ese espacio tridimensional las respuestas de todas las neuronas registradas en un mismo animal, apreciamos cuatro "globos" nítidos de actividad en las redes neuronales: uno se asocia al estado de reposo cerebral, otro al terremoto, un tercero al soplido dorsal y el cuarto, al desplome del ascensor. Cada uno de nuestros experimentos "impactantes" se tradujo en un patrón diferenciado de actividad en las agrupaciones neuronales de CA1. En nuestra opinión, esos patrones representan información referente a los aspectos perceptivo, emotivo y fáctico de los acontecimientos.

Para apreciar la evolución dinámica de esos patrones mientras los animales pasaban las diversas pruebas, aplicamos una técnica de "ventana corredera" a registros de datos que sumaban varias horas por animal. Se desplazaba la ventana a través de los registros momento a momento; se efectuaba luego el análisis AMD para cada ventana de medio segundo de duración. Así, logramos visualizar la evolución temporal de la respuesta conforme el animal iba fijando, estrato a estrato, los recuerdos de cada acontecimiento mientras éste se desarrollaba. Así, en un ratón que sufrió un terremoto observamos que la actividad neuronal comenzaba en el globo de reposo, se disparaba hacia el del terremoto y retornaba después al estado de reposo, describiendo una trayectoria triangular característica.

El análisis cronológico nos reveló algo de mayor interés todavía: las pautas de actividad asociadas a esas experiencias impactantes se repetían de forma espontánea a intervalos que oscilaban entre segundos y minutos después de acontecido el suceso real. Esos "ecos" exhibían una trayectoria similar (incluida la forma geométrica característica), aunque de amplitud menor que la respuesta original. La recurrencia de esas pautas de activación demuestra que el viaje de la información a través del sistema del hipocampo estaba inscrito en los circuitos de memoria del cerebro; suponemos que los "ecos" corresponden a evocaciones de lo experimentado, posteriores al suceso. Tamaña capacidad para medir cualitativa y cuantitativamente la reactivación espontánea de los patrones que codifican los recuerdos abre una rendija por donde atisbar el modo en que los recuerdos recién formados se consolidan en recuerdos duraderos. Asimismo, permite examinar tales procesos en ratones superdotados o en otros con trastornos de aprendizaje.

Agrupaciones neuronales

Nos propusimos luego averiguar la participación de esas neuronas en la codificación de los acontecimientos. Y empezamos por acoplar otra herramienta matemática, el análisis

CUESTIONES PENDIENTES

El autor confía seguir investigando con ratones para responder, entre otras, a las siguientes cuestiones:

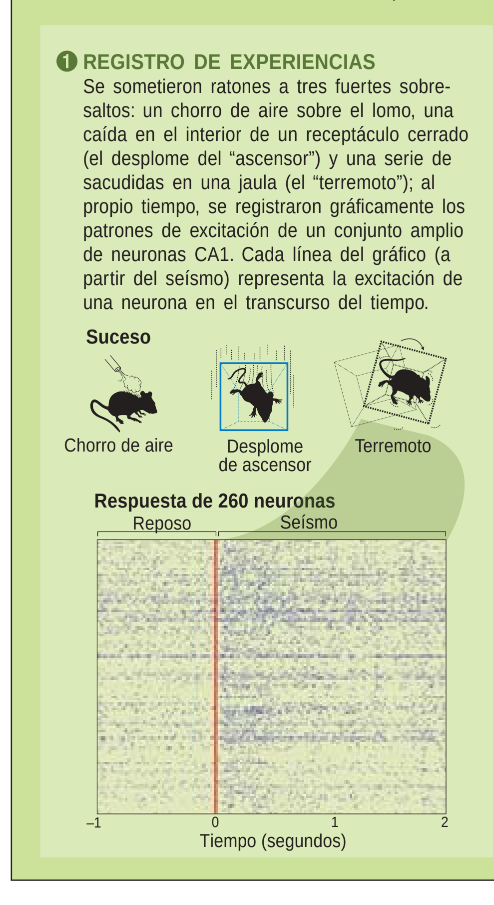
- ¿Codifican las subpoblaciones de neuronas de una agrupación neuronal, o "clique", aspectos distintos de un acontecimiento? Por ejemplo, ¿contienen las agrupaciones neuronales que codifican recuerdos de miedo un subconjunto de neuronas que responde a la intensidad del miedo, mientras que otro subconjunto se limita a consignar la naturaleza aterradora del suceso?
- ¿En qué se diferencian las trazas de reminiscencia (recurrencias de las pautas de excitación que tienen lugar cuando se fija un recuerdo por vez primera) al poco de un acontecimiento y después de un largo tiempo? ¿Cómo se generan falsos recuerdos con el paso del tiempo?
- ¿Cómo podrían utilizarse los códigos binarios extraídos de las señales eléctricas del cerebro para la descarga en un ordenador de recuerdos y pensamientos, el control de máquinas robóticas o el registro en tiempo real de los procesos de aprendizaje?

CODIFICACION DE LOS RECUERDOS

Para ahondar en el código que utiliza el cerebro en la fijación de recuerdos, se ha llevado a cabo el análisis de señales cerebrales mediante una batería de procedimientos innovadores.

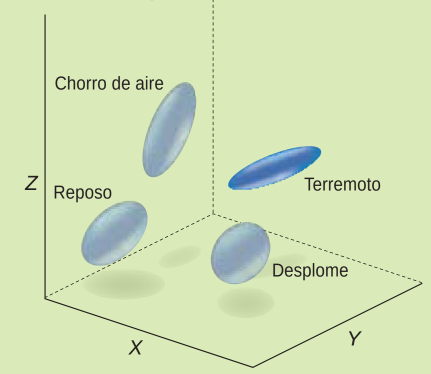
1 REGISTRO DE EXPERIENCIAS

Se sometieron ratones a tres fuertes sobresaltos: un chorro de aire sobre el lomo, una caída en el interior de un receptáculo cerrado (el desplome del "ascensor") y una serie de sacudidas en una jaula (el "terremoto"); al propio tiempo, se registraron gráficamente los patrones de excitación de un conjunto amplio de neuronas CA1. Cada línea del gráfico (a partir del seísmo) representa la excitación de una neurona en el transcurso del tiempo.



2 ALGORITMOS DE RECONOCIMIENTO DE PATRONES

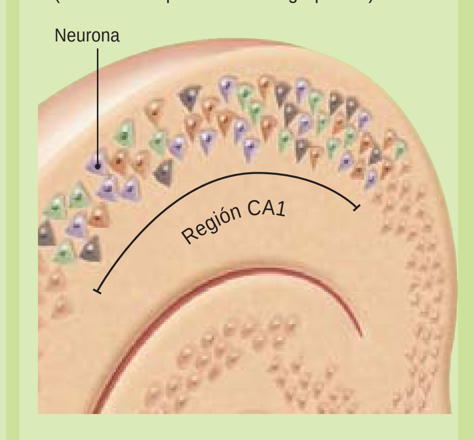
Los datos recopilados para cada ratón se proyectaron en un gráfico tridimensional, que representaba la actividad de todo el conjunto de neuronas registrado mientras el animal estaba tranquilo y mientras sufría los sobresaltos. Ese sistema gráfico permite "leer" lo que experimenta un animal sin más que observar el movimiento de la señal en el espacio tridimensional.



3 AGRUPACIONES NEURONALES

Análisis ulteriores revelaron que los conjuntos de neuronas activas durante un acontecimiento constan de subconjuntos o agrupaciones ("cliques"). Las células de una misma agrupación exhiben patrones de excitación muy similares; no forman parte de otras agrupaciones neuronales.

Esquema de las agrupaciones neuronales que codifican la experiencia del seísmo
(cada color representa una agrupación)



de agrupamiento jerárquico, a los métodos secuenciales AMD. Osan y yo descubrimos que esos patrones colectivos de nivel de red estaban generados por subconjuntos peculiares de poblaciones neuronales a las que convenimos en llamar "cliques" neuronales. (Una agrupación o "clique" es un conjunto de neuronas que responden de una manera parecida ante un episodio escogido y opera, por ende, de una manera colectiva, constituida en unidad codificadora, muy robusta.)

Descubrimos que cada acontecimiento está representado siempre por un conjunto de agrupaciones neuronales ("cliques") que codifican aspectos distintos, del más general al más específico. Así, el episodio "sísmico" activa a una agrupación neuronal de alerta general (que responde a los tres estímulos alarmantes), a otra agrupación neuronal que responde sólo a los acontecimientos que entrañan una perturbación del movimiento (el "terremoto" o el desplome del "ascensor"), a un tercer grupo que es activado exclusivamente por sacudidas y a un cuarto que señala dónde tuvo lugar el acontecimiento (colocábamos al animal en uno de dos receptáculos antes de someterlo al simulacro de terremoto).

Por consiguiente, la información sobre esos acontecimientos episódicos queda representada por conjuntos de agrupaciones neuronales que están invariablemente organizadas de una forma jerárquica (desde lo general a lo específico). Según nuestra hipótesis, esa disposición jerárquica forma una suerte de pirámide de codificación de las propiedades situacionales: en la base hallaríamos las de tipo general ("acontecimiento alarmante inesperado") y en el vértice las más específicas ("sacudidas" o "sacudidas dentro de la caja negra").

A la región CA1 del hipocampo llegan señales procedentes de diversas zonas cerebrales y sistemas sensoriales. Tal aferencia repercute a buen seguro en el tipo de información que codifica una agrupación neuronal o "clique" determinada. Por ejemplo, la agrupación que responde a los tres sucesos alarmantes integraría información llegada de la amígdala (que procesa el miedo y otras emociones, así como la experiencia de novedades); codificaría por tanto que "estos acontecimientos son terroríficos y desconcertantes". Por otra parte, las agrupaciones de neuronas que responden al terremoto y a la caída del ascensor procesarían señales procedentes del sistema vestibular (que aporta información sobre la perturbación del movimiento); codificarían pensamientos del tipo "estos acontecimientos me hacen perder el equilibrio".

De forma análoga, las agrupaciones neuronales o "cliques" que responden sólo a un suceso concreto que ocurre en un lugar determinado integrarían señales aferentes desde

ALICE Y. CHEN (*1, 3*); LUCY READING-IKKANDA (*2, 4 y 5*)



UNIVERSIDAD DE PRINCETON (ratón)

células de ubicación (neuronas que se excitan cuando una criatura pasa por un lugar concreto de su entorno habitual); codificarían que "este seísmo tuvo lugar en el receptáculo negro".

Pirámides cognitivas

Nuestros descubrimientos arrojan luz sobre los principios organizativos que gobiernan la codificación de la memoria. Parece que las agrupaciones neuronales constituyen las unidades funcionales de codificación que generan los recuerdos. Gozan de potencia suficiente para representar información, a pesar de que algunas neuronas del conjunto varíen algo en su actividad. Aunque la hipótesis de que los recuerdos y la percepción pudieran estar representados por poblaciones de neuronas no es nueva, creemos haber obtenido los primeros datos experimentales que revelan el modo en que se organiza esa información en la población neuronal.

Para el registro y extracción de distintos aspectos de un mismo acontecimiento, el cerebro se basa en "cliques" o agrupaciones neuronales de codificación de recuerdos. En esencia, dispone la información relativa a un suceso dado en una pirámide cuyos niveles se organizan de forma jerárquica: de los más abstractos y generales a los más específicos. La unión de varias de esas pirámides daría lugar a un poliedro que representaría a todos los acontecimientos que encajan en una categoría; por ejemplo, la de "sucesos alarmantes".

Ese proceder combinatorio y jerárquico de la formación de recuerdos le proporciona al cerebro una vía de generar un número casi ilimitado de patrones reticulares para la representación del número infinito de sucesos que un organismo experimentaría en el transcurso de su vida, a la manera en que las cuatro "letras" o nucleótidos que componen las moléculas de ADN adoptan un número poco menos que ilimitado de combinaciones para producir la amplísima variedad de organismos que pueblan la Tierra.

Y dado que el código de la memoria es categórico y jerárquico, la representación de una experiencia nueva podría consistir en la simple sustitución de las agrupaciones neuronales que forman el ápice de las pirámides de recuerdos para indicar, por ejemplo, que esta vez el perro que ladra al otro lado del seto es un pequinés y no un pastor alemán, o que el terremoto se produjo en California y no en Indonesia.

La hipótesis de que el cerebro constituye algo más que un mero dispositivo capaz de recordar cada detalle de un acontecimiento determinado queda reforzada cuando se comprueba que cada pirámide de codificación de recuerdos contiene, de forma invariable, agrupaciones de neuronas que procesan información abstracta.

Las "cliques" o agrupaciones neuronales del sistema de memoria permiten que el cerebro codifique los aspectos esenciales de episodios concretos y que, al propio tiempo, extraiga de esas experiencias información general aplicable a una situación futura que comparta propiedades básicas, aunque varíe en los detalles. Esa capacidad para generar conceptos y conocimientos abstractos a partir de experiencias cotidianas constituye la esencia de nuestra inteligencia; nos permite resolver problemas nuevos en un mundo siempre cambiante.

Tomemos, por ejemplo, el concepto de "cama". Si entráramos en cualquier habitación de cualquier hotel, reconoceríamos inmediatamente la cama, aunque jamás hubiéramos visto antes esa cama en concreto. Es la estructura de nuestras redes de codificación de recuerdos la que nos permite retener no sólo la imagen de una cama concreta, sino también una idea general de lo que corresponde a una cama. Nos lo demuestran los ratones.

En efecto, en el curso de nuestros experimentos, descubrimos por azar un número restringido de neuronas

PARA TI ES UN PLATO, PARA MI, UN NIDO

Trabajos recientes respaldan la idea de que algunas agrupaciones neuronales del hipocampo codifican conceptos abstractos. En el ratón, ciertas neuronas se excitan ante objetos de diversas formas y texturas sólo si los objetos en cuestión presentan depresiones accesibles, que puedan servir de nido. Si se rellenan las cavidades, las neuronas dejan de responder.

UN RATON DESCANSA en un plato, que para él es un nido.



del hipocampo que parecían responder a la noción abstracta de "nido". Esas células reaccionaban con vigor ante todo tipo de nidos, fueran redondos, cuadrados o triangulares, hechos de algodón, de plástico o de madera. Si colocábamos un cristal sobre un nido, de modo que el animal lo viera, pero no pudiera instalarse en él, las células "nidales" dejaban de excitarse. Hemos llegado a la conclusión de que esas células no responden a las características físicas específicas del nido (aspecto, forma, o material), sino a su funcionalidad: un nido es un "lugar donde acurrucarse para dormir".

Parece que la organización categorial y jerárquica de las agrupaciones neuronales representa un mecanismo general no sólo para la codificación de la memoria, sino también para el procesamiento y la representación de otros tipos de información en áreas cerebrales externas al hipocampo, desde la percepción sensorial hasta los pensamientos conscientes. Varios indicios lo respaldan. En el sistema visual, por ejemplo, se han descubierto neuronas que responden a "caras": rostros humanos, caras de monos e incluso hojas que tienen la forma de una cara. Se han hallado neuronas que responden sólo a una subclase de rostros.

Volviendo al hipocampo, en estudios sobre enfermos de epilepsia se ha descubierto la existencia de un subconjunto de células que aceleran su ritmo de excitación en respuesta a imágenes de personas famosas. Más todavía, Itzhad Fried, de la Universidad de California en Los Angeles, observó que cierta neurona del hipocampo de un paciente parecía responder sólo a la actriz Halle Berry.

Todos esos datos, tomados en conjunto, respaldan la idea de que la organización jerárquica de las unidades de procesamiento de la información, que va de lo general a lo específico, constituye un principio general de organización que opera en todo el cerebro.

Código binario para los recuerdos

Nuestro trabajo con múridos abrió un camino para la comparación de patrones de cerebros distintos, así como para la transferencia de información desde un cerebro hacia un ordenador. Mediante el procedimiento matemático de inversión de matrices tradujimos la actividad de conjuntos de agrupaciones neuronales, de conjuntos de "cliques", en cadenas de código binario, en las que un 1 representaba un estado activo y un 0 correspondía a un estado inactivo, para cada unidad de codificación. Por ejemplo, el recuerdo de un terremoto se convertía en "11001", donde el primer 1 representaba la activación de la agrupación neuronal general de sobresalto, el segundo 1 correspondía a la activación de la agrupación neuronal que respondía a una perturbación del movimiento, el primer 0 indicaba falta de actividad en la agrupación neuronal del soplido dorsal, el segundo 0 indicaba inactividad en la agrupación neuronal de desplome del ascensor y el 1 final indicaba activación de la agrupación neuronal correspondiente al terremoto.

Mediante la aplicación de un código binario semejante para describir la actividad de los grupos neuronales de cuatro ratones hemos logrado pronosticar, con una precisión del 99 por ciento, qué suceso habían experimentado y en dónde había acontecido. Dicho de otro modo, al aplicar el código binario nos fue posible leer y comparar matemáticamente la mente de los animales.

Un código binario cerebral proporcionaría una referencia para el estudio de la cognición, incluso de forma transversal entre especies distintas. Asimismo, facilitaría el diseño

LEER EL PENSAMIENTO

Nuestra capacidad, cada vez mayor, para leer en la mente de los ratones suscita una posibilidad inquietante: si nos fuera asequible registrar la actividad simultánea de un número suficientemente grande de neuronas de un cerebro humano, tales datos podrían revelar los pensamientos.

Como es obvio, dicha técnica debería ser no invasiva. Las técnicas de formación de imágenes del cerebro (electroencefalografía y resonancia magnética funcional), aunque no invasivas, carecen de la sensibilidad suficiente, pues registran el promedio de las señales o el consumo de oxígeno, de millones de neuronas. Por así decirlo, graban desde el exterior, el sonido de un estadio de fútbol abarrotado de gente: el ruido impide escuchar las conversaciones.

De existir un método sensible, cabría la posibilidad de utilizarlo para averiguar si un individuo que parece hallarse en estado vegetativo ha perdido o no las capacidades cognitivas, o si una víctima del Alzheimer incapaz de hablar comprende una conversación. Tal "lectura de la mente" podría aplicarse también al diagnóstico de trastornos mentales o a la evaluación de medicamentos. O al diseño de polígrafos más fiables.

En el otro platillo de la balanza pesarían graves cuestiones morales, filosóficas y sociales. Tal vez nos gustase fisgar en los pensamientos ajenos, pero ¿quiénes desearíamos que nuestra mente fuese un libro abierto?

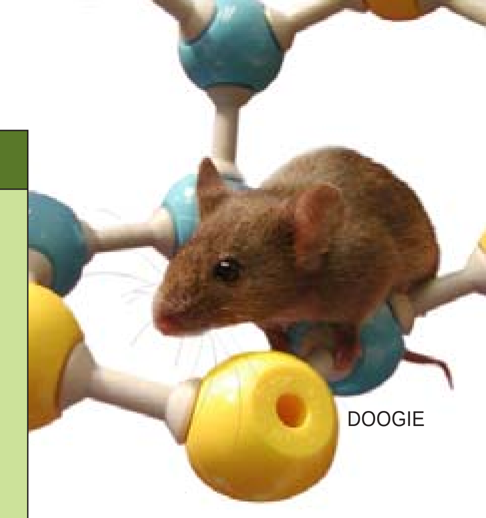
LONGNIAN LIN

MOLECULAS DE MEMORIA

Donald O. Hebb postuló en 1949 que se produce un recuerdo cuando dos células nerviosas interactúan de modo tal, que resulta reforzada la futura transmisión de señales a través de la sinapsis (el punto de contacto) entre ellas. Pero hasta los años ochenta ese principio no se observó en cortes cerebrales. Mediante la estimulación eléctrica de pares de neuronas del hipocampo, Holger Wigström y sus colaboradores, de la Universidad de Goteborg, descubrieron que la activación simultánea de una neurona presináptica (la que envía la señal) y de una neurona postsináptica (la receptora) intensificaba la eficiencia sináptica: la neurona postsináptica respondía con mayor intensidad a una misma cantidad de señal excitadora de la compañera presináptica. Los investigadores sugirieron que el receptor NMDA (complejo proteínico que se aloja en la membrana de las neuronas postsinápticas) actuaba como detector de coincidencia, responsable de la consolidación sináptica.

Para verificar esa hipótesis, decidimos manipular genéticamente una versión del receptor NMDA, que se presenta en formas distintas. Se comprobó, en ratones adultos carentes de receptores NMDA en el hipocampo, un notable déficit de memoria. Pero demostramos también lo contrario: un linaje de ratones a los que se había reforzado la producción de una subunidad específica de receptor NMDA (denominada NR2B) en el hipocampo y en la corteza (los famosos ratones Doogie) aprendían con mayor prontitud y recordaban durante más tiempo que las cepas silvestres de ratones.

En nuestra opinión, la activación (y reactivación) del receptor NMDA serviría para inscribir las pautas de actividad conjunta de las agrupaciones neuronales que codifican los recuerdos, de forma que las trazas de recordación a escala molecular se traducen a la escala de redes neuronales.



DOOGIE

de interfases sin rupturas, en "tiempo real", entre máquinas y cerebros. En tal sentido, hemos dispuesto un sistema que convierte la actividad neuronal de un ratón que está sufriendo un terremoto en un código binario que ordena la apertura de una escotilla, lo que permite al animal escapar del receptáculo cuando experimenta las sacudidas.

Nuestro enfoque proporciona, así creemos, un sistema de descodificación nuevo y más intuitivo para las prótesis y dispositivos que utilizan los pacientes con implantes neuronales para controlar un cursor en la pantalla de un ordenador o para hacer que un mono mueva un brazo robótico mediante señales registradas en su corteza motora. Además, el procesamiento en tiempo real de códigos de memoria cerebrales podría, algún día, permitir la descarga directa de recuerdos en un ordenador, para su almacenamiento digital permanente [*véase* "Una vida digital", por Gordon Bell y Jim Gemmell; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo de 2007].

Además, nosotros y otros ingenieros informáticos hemos comenzado a aplicar esos descubrimientos sobre la organización cerebral de la memoria al diseño de una nueva generación de ordenadores inteligentes y de sistemas red-céntricos, porque las máquinas actuales fracasan rotundamente en la toma de ciertas decisiones que a los humanos nos resultan sencillas (verbigracia, reconocer a un compañero de instituto aunque se haya dejado barba y hayan transcurrido 20 años).

Algún día, ordenadores y máquinas inteligentes, equipados con sensores refinados y dotados de una estructura lógica semejante a la organización categorial de las unidades codificadoras de recuerdos del hipocampo podrían no limitarse a remedar las facultades humanas y, quién sabe, si superar nuestra capacidad para afrontar situaciones cognitivas complejas.

Esos hallazgos plantean numerosas cuestiones —no poco inquietantes— de índole filosófica. Si todos nuestros recuerdos, emociones, conocimientos e imaginaciones se traducen en ristras de unos y ceros, quién sabe lo que ello va a entrañar para nuestra identidad y comportamiento.

HUIMIN WANG

El autor

Joe Z. Tsien enseña farmacología e ingeniería biomédica en el Centro de Neurobiología de Sistemas de la Universidad de Boston. Centra su investigación en la comprensión del aprendizaje y la memoria, así como en el desarrollo de técnicas de silenciamiento de genes y proteínas. En fecha reciente ha fundado el Instituto Shanghai de Genómica Funcional del Cerebro en la Universidad Normal de China Oriental.

Bibliografía complementaria

THE OXFORD HANDBOOK OF MEMORY. E. Tuvling y F. I. M. Craik. Oxford University Press, 2000.

IDENTIFICATION OF NETWORK-LEVEL CODING UNITS FOR REAL-TIME REPRESENTATION OF EPISODIC EXPERIENCE IN THE HIPPOCAMPUS. L. Lin, R. Osan, S. Shoham, W. Jin, W. Zuo y J. Z. Tsien en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 102, n.º 17, págs. 6125-6130; 26 de abril, 2005.

ORGANIZING PRINCIPLES OF REAL-TIME MEMORY ENCODING: NEURAL CLIQUE ASSEMBLIES AND UNIVERSAL NEURAL CODES. L. Lin, R. Osan y J. Z. Tsien en *Trends in Neurosciences*, vol. 29, n.º 1, págs. 48-57; enero de 2006.

NEURAL ENCODING OF THE CONCEPT OF NEST IN THE MOUSE BRAIN. L. Lin, G. Chen, H. Kuang, D. Wang y J. Z. Tsien en *Proceedings of the Natural Academy of Sciences USA*, vol. 104, n.º 14, págs. 6066-6071; 3 de abril, 2007.

Pasos de peces

Consideraciones para un diseño eficaz

En los últimos decenios se ha venido observando en los ríos españoles un rápido descenso en el volumen y diversidad de las poblaciones piscícolas migratorias. Estas especies efectúan largos desplazamientos dentro de la propia cuenca (potamodromos) o entre aguas continentales y oceánicas (anadromos).

Entre las causas de tal disminución sobresale la proliferación de obstáculos que dificultan o impiden la libre circulación de los individuos en el interior de la cuenca. Así se pone en peligro la culminación de los ciclos biológicos. Se limitan los desplazamientos de remonte de individuos adultos hacia las zonas situadas en las cabeceras, donde suelen hallarse los frezaderos; se restringe también el descenso de juveniles a las zonas de engorde en las zonas medias y bajas de los ríos. Para solucionar ese problema se construyen dispositivos de franqueo de obstáculos, que palian el problema de la movilidad, sin por ello renunciar a los beneficios que las presas proporcionan.

Se puede definir un dispositivo de franqueo como aquella infraestructura cuya finalidad es la de facilitar el paso de peces de un lado a otro de un obstáculo existente en un curso fluvial. Los dispositivos deben permitir los movimientos de ascenso y descenso, con infraestructuras específicas para ambos tipos de migración.

Los dispositivos de bajada limitan los daños que los peces pueden sufrir a su paso por turbinas o aliviaderos. Para ello se recurre a barreras físicas o de comportamiento. Las barreras físicas son rejillas de porosidad inferior al tamaño del pez. Las barreras de comportamiento, franqueables, provocan un cambio en la conducta del pez; le inducen a variar su recorrido. Sirven a ese fin barreras de burbujas, luminosas, eléctricas o acústicas.

Los dispositivos de remonte afectan a una migración activa, que supone un esfuerzo por parte del pez. Le permiten superar el obstáculo en su ascenso aguas arriba, aunque pueden valer también para el descenso. Atraen a los peces hacia un punto determinado aguas abajo del obstáculo y los incitan a superarlo en sentido ascendente mediante la creación de una vía de agua. O se les captura para su posterior suelta aguas arriba.

Es grande la diversidad de dispositivos de franqueo. Los hay de funcionamiento discontinuo: ascensores y esclusas; y de funcionamiento continuo: escalas de peces, ríos artificiales, rampas, arreglos en desvíos provisionales, etcétera. En todos ellos se distinguen tres partes: la entrada o llamada, cuya finalidad es incitar al pez a introducirse en el dispositivo, el dispositivo en sí y la salida, que permite su reincorporación al curso fluvial. Las escalas de peces son las infraestructuras habituales. A ellas nos referiremos. Están formadas por un canal en pendiente, donde se disponen de forma transversal a la corriente una serie de tabiques de diferentes diseños, que conforman una serie de depósitos o vasos y comunican la parte de aguas arriba del obstáculo con la del curso inferior.

Los tres elementos que condicionan el funcionamiento eficaz de un paso de peces son el curso fluvial, las especies usuarias y el dispositivo propiamente dicho, que es lo único manipulable y ha de adaptarse a las características de los otros dos. La valoración de un diseño de paso de peces exige un estudio experimental, realizado sobre un modelo reducido, que posibilite el conocimiento de su comportamiento hidráulico y cuantifique la adecuación del flujo que va a mantener a las capacidades natatorias de los individuos. Ese flujo ha de aportar las profundidades que los peces requieren. Velocidad y calado son los dos parámetros fundamentales.

La velocidad tiene que ser compatible con la capacidad natatoria del animal. Se precisa conocer su valor y evolución dentro de la escala (el



1. Escala de peces en el río Landro. Se indican las tres partes constituyentes de un paso de peces.



2. Detalle de los deflectores en una escala de peces del río Ouro.

"campo de velocidades") e identificar las zonas donde las velocidades son más elevadas, que supondrán un mayor esfuerzo por parte del pez, y las zonas de velocidades bajas, en las cuales podrá descansar. La velocidad que puede desarrollar depende de la especie y aumenta con el tamaño del pez y la temperatura del agua.

Se pueden distinguir, además, dos niveles de velocidad: sostenible y de punta. La velocidad sostenible depende de la musculatura roja (de funcionamiento aerobio), cuya actividad puede mantenerse durante períodos prolongados de tiempo. La velocidad punta depende de la actividad de la musculatura blanca (de funcionamiento anaerobio). La velocidad punta, mucho mayor que la sostenible, sólo puede mantenerse breve tiempo; recibe su energía de la transformación del glucógeno muscular en ácido láctico. Existen diversos métodos y criterios para la determinación de la velocidad punta, lo que dificulta la comparación de resultados; a modo de ejemplo, para un salmónido de 35 cm a una temperatura del agua de 15 ºC se obtienen resultados que oscilan entre los 3,5 y los 7,5 m/s.

El calado ha de ser superior a un mínimo para permitir la existencia y el remonte de los peces. Teniendo en cuenta los índices de conformidad, que cuantifican el bienestar de un pez en una corriente, podemos considerar suficiente un calado de 0,35 m para truchas y de 0,5 m para salmones. Su distribución en los depósitos y su relación con el caudal son aspectos importantes en el funcionamiento.

El diseño de un paso de peces eficiente implica, pues, conocer las condiciones hidrodinámicas que en él se establecerán. Según las especies destinatarias, determinaremos los caudales donde mejorar funcionará el dispositivo, su cota de arranque, la pendiente del curso y las dimensiones de los vasos.

La mayoría de las obras de mejora de accesibilidad de los ríos españoles datan de las últimas dos décadas y el funcionamiento de éstas es, en general, aceptable. En las cuencas en donde se han abordado obras de mejora se han observado incrementos, en algunos casos espectaculares (superando con creces el 100 %), en las capturas de salmónidos. La gran tarea pendiente son las obras de franqueo destinadas a grandes presas que precisan una inversión considerable y el establecimiento de dispositivos de bajada.

TERESA TEIJEIRO RODRÍGUEZ
Departamento de Ingeniería Agroforestal
Universidad de Santiago de Compostela

Tall Humeida

Las primeras sociedades complejas

En 2004, nacía el Proyecto Arqueológico Medio Eufrates Sirio (PAMES), con el objetivo de estudiar un sector del valle del río Eufrates, una garganta impresionante de la provincia siria de Deir ez-Zor, llamada Hanuqa ("Desfiladero") por los árabes. Allí, el cauce del río se encaja debido a la mayor dureza de la roca de basalto del lugar. Este punto de inflexión dentro del valle del Medio Eufrates sirio ha constituido una zona inmejorable para controlar el tráfico fluvial, que desde finales del IV milenio a.C. fue muy intenso en la región. La navegabilidad del Eufrates favorecía la comunicación y, por tanto, el intercambio comercial entre el norte de Siria y el sureste de Turquía, por un lado, y la llanura mesopotámica (el actual Irak), por otro.

La garganta de Hanuqa condicionó el discurrir histórico de la región sirio-mesopotámica. Dado su valor estratégico, debió de perseguirse desde los orígenes de la civilización un férreo control sobre ella. Sin embargo, si hiciéramos caso a



1. Cuenco de cerámica elaborado a mano del período Uruk (3300 a.C.), encontrado en el yacimiento de Tall Humeida (Siria).

FOTOGRAFIA DE ELOY TABOADA



2. Panorámica de Tall Humeida.

todos los mapas arqueológicos publicados sobre la región, ésta estuvo deshabitada en época preclásica. Este vacío de ocupación humana durante el período de los grandes reinos e imperios próximo-orientales no podía ser real. Probablemente era consecuencia de una laguna de la investigación.

Las dos campañas de campo llevadas a cabo en 2005 y 2006 por el equipo sirio-español del Proyecto Arqueológico Medio Eufrates Sirio nos han dado la razón. La región inmediata a la garganta de Hanuqa estuvo habitada mucho antes del período clásico. Los trabajos de prospección sobre el terreno nos han permitido documentar hasta el momento seis yacimientos, fechados entre finales del IV milenio y mediados del I a.C. Esta continuidad de la presencia humana muestra la importancia geopolítica y económica de la región. Son casi tres milenios de historia acumulados a la entrada y la salida del desfiladero de Hanuqa.

De los diversos hallazgos realizados hasta la fecha en la zona, el más relevante tuvo lugar en 2006: Tall Humeida. El descubrimiento de este yacimiento arqueológico sacaba a la luz un lugar clave para la investigación del origen de la civilización urbana, las primeras ciudades y los primeros textos de la historia; en definitiva, de las primeras sociedades complejas de las que tenemos constancia.

Curiosamente, Tall Humeida no era un yacimiento desconocido del todo. Exploradores y viajeros europeos de mediados del siglo XIX lo mencionan. Gertrude Bell, que visitó el lugar en 1910, describía así las ruinas de Humeida: "...había vestigios de una ciudad considerable, piedras talladas, muros de ladrillo y un sarcófago de piedra". Para ella, estos restos correspondían a la antigua ciudad de *Thillada Mirrhada*, citada en "La Ruta de los Partos" (s. III a.C.). Desgraciadamente, Bell se equivocó en su identificación, pues los vestigios de que habla en su libro *A Journey Along the Banks of the Euphrates* pertenecen a la época bizantina (s. VI d.C.).

Además de estos vestigios tardorromanos, el estudio realizado por nuestro equipo ha puesto de manifiesto que la mayor parte de los restos arqueológicos de la colina de Humeida pertenecen a una colonia fundada por gentes llegadas desde la Mesopotamia meridional hace más de 5000 años. Desde mediados del IV milenio a.C., la denominada cultura de Uruk (ciudad situada en el sur de Irak) desarrolló un complejo proceso de expansión por los valles del Eufrates y del Tigris, así como por el suroeste de Irán. Se proponía fundar, por razones que aún no están del todo claras, enclaves y colonias dotados de una cultura típicamente mesopotámica fuera de su propio territorio, el área geográfica conocida como país de Súmer.

La cultura de Uruk constituye una de las etapas más fascinantes y brillantes de la historia antigua. Uruk representa el nacimiento de la civilización, una experiencia incomparable que transformará las sociedades prehistóricas en otras mucho más complejas. Estamos asistiendo al proceso de formación del primer estado, o "estado arcaico", que modificará totalmente la economía y la sociedad de aquella época. Es un período de grandes logros: el primer urbanismo, la primera arquitectura monumental, la primera rueda, la primera escritura y la primera producción en serie. Es, en definitiva, la época de las primeras ciudades, de la "revolución urbana". A este singular contexto histórico-cultural pertenece el yacimiento arqueológico de Tall Humeida localizado por el equipo sirio-español en 2006.

De los materiales arqueológicos recuperados en la superficie de Tall Humeida destaca la masiva presencia de una forma de cerámica que caracteriza arqueológicamente a la cultura de Uruk, su "fósil tipo": los cuencos de borde biselado, vasos troncocónicos elaborados a mano y con un acabado muy tosco, cuya función precisa ha dado origen a no pocas hipótesis. De lo que no hay dudas es de que corresponden a una producción de cerámica en serie, fechada en el período Uruk Reciente (3300 a.C.).

En resumen, con este proyecto científico, la arqueología española contribuye por primera vez con nuevos datos a la reconstrucción del proceso histórico que fue el nacimiento de la civilización.

JUAN LUIS MONTERO FENOLLÓS
Director científico del Proyecto
Universidad de La Coruña

FOTOGRAFIA DE ELOY TABOADA

Pilas de combustible

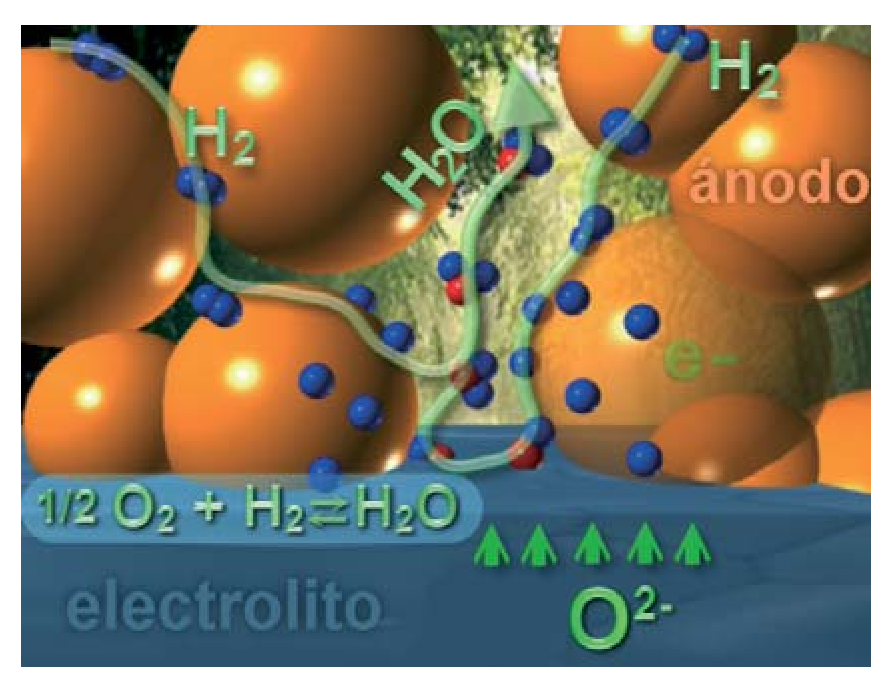
Anodos de óxidos sólidos

La subida continua del precio de los combustibles fósiles en los últimos años y los graves problemas ambientales asociados a la emisión de gases de efecto invernadero emitidos en su combustión han suscitado un creciente interés en el desarrollo de fuentes de energía alternativas, más eficientes y menos contaminantes. En este contexto, las pilas de combustible ofrecen una vía para la explotación de la energía eléctrica más limpia y eficiente que la vía aportada por los generadores actuales basados en la combustión de hidrocarburos.

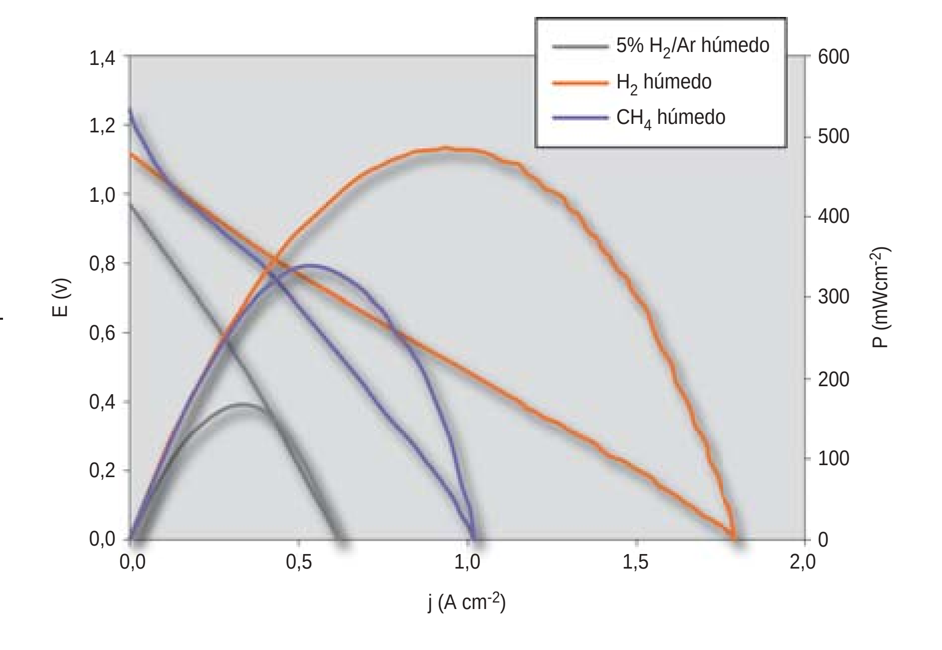
Las pilas de combustible de óxido sólido (SOFC, de "solid oxide fuel cell") se consideran uno de los mejores candidatos para la generación estática de grandes cantidades de energía. Sin embargo, y a pesar de que ya existen pilas con capacidades de varios megawatt, la técnica requiere mejoras. Deben desarrollarse, entre otros elementos, componentes que ofrezcan mejores prestaciones a temperaturas inferiores y durante un tiempo de operación más largo.

Uno de los objetivos que mayor atención han recibido en los últimos años es el desarrollo de ánodos que operen de un modo eficiente en celdas alimentadas con hidrocarburos. Los ánodos más habituales son los cermets (material compuesto cerámico-metal) de Ni-YSZ. YSZ constituye el electrolito habitual en las pilas SOFC; corresponde a un óxido de zirconio (ZrO_2) en el que una parte del zirconio se sustituye por itrio (Y) con el fin de generar vacantes aniónicas. (Se describe mediante la fórmula general $Zr_{1-x}Y_xO_{2-x/2}$.)

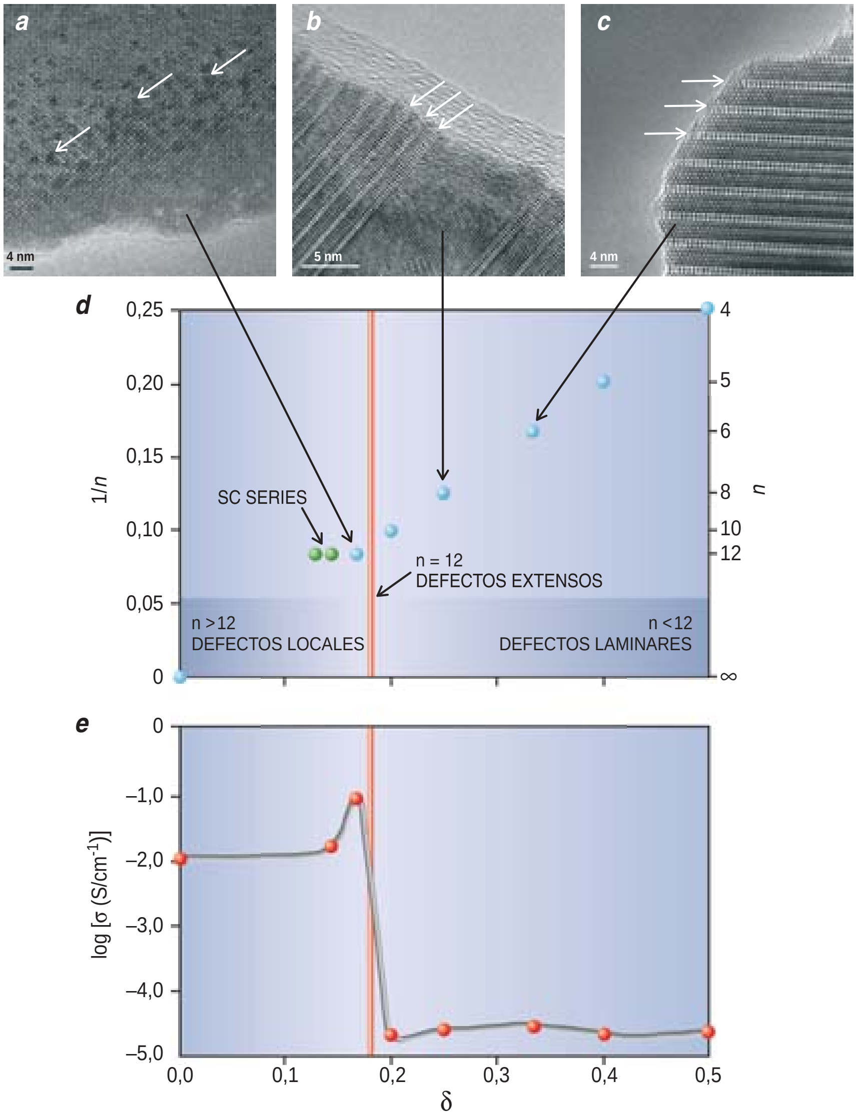
Los ánodos de Ni-YSZ muestran una excelente actividad catalítica para la oxidación de combustibles junto con una elevada conductividad electrónica, debida al níquel metálico, y iónica, por el YSZ. Sin embargo, presentan una serie de inconvenientes que limitan su aplicación: baja tolerancia a impurezas sulfuradas (habituales en los derivados del petróleo) y formación de depósitos de carbono que bloquean el acceso del gas a los sitios activos. Degradan la celda y plantean problemas relacionados con la estabilidad mecánica en ciclos de oxidación-reducción. Los ánodos en cuestión ofrecen altas prestaciones en SOFC alimentadas con hidrógeno puro, mientras que su rendimiento empeora cuando se emplean hidro-



1. Procesos que ocurren en la interfase ánodo-electrolito de una pila de combustible: el hidrógeno (*esferas azules*) reacciona con el oxígeno (*esferas rojas*) para formar agua.



2. Curvas de rendimiento de una pila de combustible de óxido sólido en atmósferas distintas (todas con un 3 por ciento de humedad): hidrógeno diluido en argón (5% H_2/Ar, *gris*), hidrógeno (H_2, *naranja*) y metano (CH_4, *lila*). El material del ánodo corresponde a LSTMG ($La_4Sr_8Ti_{11}Mn_{0,5}Ga_{0,5}O_{37,5}$), el cátodo a LSM ($La_{0,8}Sr_{0,2}MnO_3$) y el electrolito a YSZ ($Zr_{1-x}Y_xO_{2-x/2}$). *E* representa la diferencia de potencial entre electrodos, *j* la densidad de corriente y *P* la densidad de potencia. Debido a su estructura y composición químicas, el compuesto LSTMG ofrece unas prestaciones extraordinarias en pilas alimentadas con metano; constituye por ello un paso adelante en el desarrollo de pilas que operen directamente con gas natural o biogás.



3. Relación entre la microestructura, la composición y la conductividad de distintos ánodos de la serie $La_4Sr_{n-4}Ti_nO_{3n+2}$. Las microscopías electrónicas de transmisión de alta resolución (HRTEM) muestran una estructura con defectos locales desordenados ($n = 12$, *a*), otra con distribución al azar de láminas ricas en oxígeno ($n = 8$, *b*) y una última con defectos extensos con exceso de oxígeno perfectamente ordenados ($n = 6$, *c*) (las flechas blancas señalan los defectos estructurales). Estas fases se localizan en un mapa de composición (*d*), donde se representa $1/n$ en función del exceso de oxígeno δ en la unidad de perovskita $ABO_{3\text{-}\delta}$. La conductividad electrónica, determinada por espectroscopía de impedancia de corriente alterna, se representa también en función de δ (*e*).

carburos; si bien, desde el punto de vista termodinámico deberían obtenerse resultados mejores.

La oxidación directa de hidrocarburos en pilas SOFC daría lugar a mejores prestaciones. Se han realizado ensayos con cermets alternativos, como Cu-YSZ-CeO_2, donde la deposición de carbono se controla mejor. Se cuenta también con la posibilidad de emplear óxidos mixtos dotados de propiedades mejoradas. Por ejemplo, sistemas que presentan defectos extensos ordenados en los que, mediante una modificación de la composición química, se consigue desordenarlos dando lugar a nuevos materiales electroquímicamente activos.

Los defectos extensos actúan como barreras que impiden el transporte de los electrones. La rotura y disolución de la barrera produce un aumento de la conductividad electrónica. Para llevar a cabo la rotura y disolución de defectos se requiere un control preciso de la cantidad de oxígeno en las fases del sistema $(La,Sr)TiO_{3+\delta}$. Ello se consigue mediante la modificación de la relación entre lantano y estroncio (La/Sr). Se obtienen así fases con una cantidad notable de defectos locales. Merced a tales modificaciones químicas y estructurales se consiguen aumentos de hasta cuatro órdenes de magnitud en la conductividad eléctrica.

Si a la modificación estructural se le añade una “funcionalización” del material a través de la introducción de pequeños cambios en la composición química, se obtienen nuevos compuestos con una actividad electrocatalítica notable. Hasta la fecha, los mejores resultados se han cosechado mediante la substitución parcial de titanio (Ti) por galio (Ga) y manganeso (Mn). El material de ánodo resultante, $La_4Sr_8Ti_{11}Mn_{0,5}Ga_{0,5}O_{37,5}$ (LSTMG), exhibe resistencias de polarización equiparables a las conseguidas por los cermets estándar Ni-YSZ en hidrógeno (0,12 $\Omega\,cm^2$ a 950 ºC). Más importante todavía: ofrece unas prestaciones extraordinarias en pilas alimentadas con metano, con un aumento en el voltaje de hasta un 40 por ciento. Semejante incremento del voltaje podría implicar un aumento similar en la energía eléctrica que se generaría mediante una pila SOFC a partir de un mismo volumen de combustible (gas natural o biogás).

Se trata, por tanto, de un nuevo material de ánodo que permite dar un paso adelante en el desarrollo de pilas que operen directamente con gas natural o biogás. Facilitaría el diseño de pilas SOFC más eficientes, con una drástica reducción de emisiones de CO_2. Con todo, antes deberán proseguir los ensayos de estos y otros materiales de nuevo cuño para comprobar su comportamiento tras períodos largos de operación, de cara a su producción a gran escala en pilas comerciales.

JESÚS CANALES VÁZQUEZ
Instituto de Energías Renovables, Parque Científico y Tecnológico de Albacete, Campus Universitario, Albacete

JUAN CARLOS RUIZ MORALES
y DAVID MARRERO LÓPEZ
Depto. de Química Inorgánica, Universidad de La Laguna, Tenerife

La red terrorista del 11-M

Debilidades convertidas en fuerza

Iniciamos el siglo XXI con dos cruentos atentados terroristas (el del 11 de septiembre de 2001 en los Estados Unidos y el del 11 de marzo de 2004 en Madrid) que ponen de manifiesto la consolidación y dimensión del nuevo terrorismo internacional. La acción terrorista adquiere una forma y dimensión no conocida hasta el momento y, además, de difícil detección: las redes.

Las redes son ideales, por la dificultad que entraña visualizarlas y analizarlas, para las nuevas formas de acción y organización terrorista. Las organizaciones terroristas se renuevan, transforman y adaptan gracias a las redes (de transferencia de información, de establecimiento de confianza y de articulación de acciones). Uno de los problemas fundamentales para entender y hacer frente a este nuevo fenómeno es su forma y dinámica de red.

Método y datos

En este trabajo analizamos la red terrorista del 11-M por medio del análisis de redes, que se centra en las relaciones entre los actores y examina sus posiciones y las estructuras emergentes. Para ello utilizamos matrices relacionales, que recogen las relaciones (hechas públicas) de los implicados, y programas estadísticos y de visualización específicos de redes (Ucinet6, Netdraw).

Uno de los problemas y limitaciones principales para la construcción y visualización de la red 11-M es el hecho de que los datos son *incompletos*, sus *fronteras* son *difusas* y la red es *dinámica* (en continuo cambio y transformación).

Para analizar la red del 11-M se recoge la información aparecida en la prensa nacional y los informes anuales del Ministerio del Interior correspondiente al año 2004. Ello nos permite trabajar con relaciones de tipo débil o esporádico (contactos, conocidos) y con relaciones fuertes y de confianza (parentesco, amistad, convivencia, negocios conjuntos o haber estado juntos en prisión). Haber participado en atentados terroristas previos (Casablanca y 11 de septiembre), haber estado en campos de entrenamiento, haber participado en conflictos armados (en Chechenia, Bosnia y Afganistán) y pertenecer a organizaciones radicales islámicas configuran un sistema de confianza basado en la pertenencia a la red islámica internacional que configura Al Qaeda. Con esa información se construyen diversas matrices relacionales que permiten el análisis de redes y su visualización.

Los gráficos producidos a partir de las relaciones estudiadas incorporan varios elementos diferenciadores. Las líneas muestran la existencia de relación entre los actores (representados por un círculo). Su grosor indica la intensidad de la relación, es decir, la medida en que existen varias relaciones (sean de tipo débil o fuerte) entre los actores. El tamaño de los círculos refleja la centralidad de los actores, determinada por el número de relaciones directas que mantienen: cuantas más relaciones mayor es el círculo. Los colores indican condiciones diferenciadas: el rojo representa a los autores materiales de los atentados, el naranja a los llamados responsables intelectuales, el amarillo a los ligados a la trama proveedora de explosivos y el verde a los colaboradores. La red de implicados en el 11-S que están también relacionados con la red del 11-M se diferencia por los colores violeta y magentas: Mohamed Atta (uno de los autores del 11-S) está en violeta, los procesados y sentenciados en España (abril 2005) aparecen en magenta, y en magenta claro los procesados pero absueltos. Los círculos en blanco corresponden a actores relacionados con los procesados e directamente implicados. El color azul de los bordes de los círculos identifica a aquellos actores que están relacionados con la red islámica internacional por haber participado en atentados terroristas previos, haber estado en campos de entrenamiento, haber participado en conflictos armados y pertenecer a organizaciones radicales islámicas

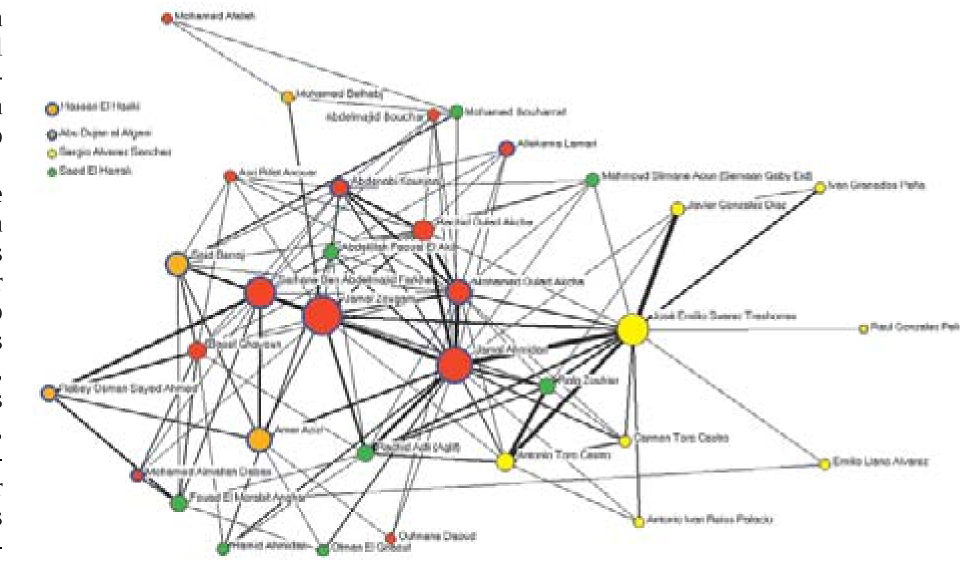
La red del 11-M

La parte más sustancial de la información sobre el 11-M (y de la investigación policial y judicial que resulta en el Sumario Judicial de 2006) se ha centrado en aquellos

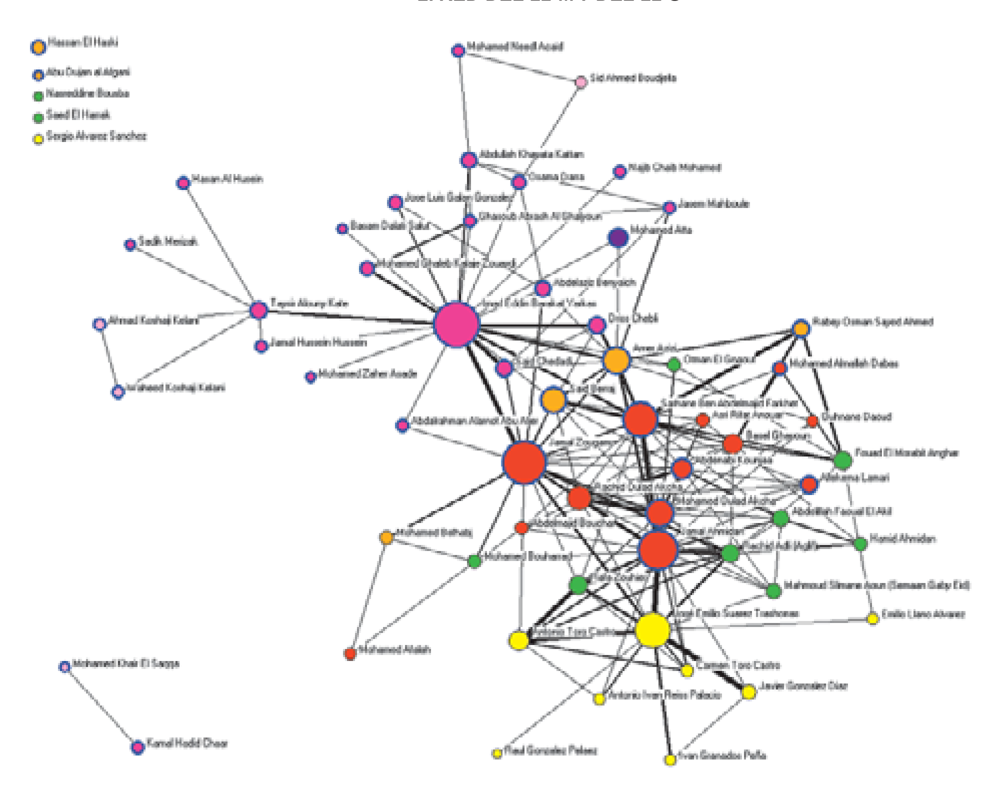
- Autores materiales 11-M
- Responsables intelectuales 11-M
- Proveedores de explosivos 11-M
- Colaboradores 11-M
- Autores materiales 11-S
- Sentenciados 11-S
- Procesados y absueltos 11-S
- Otros

1. RED DE ACCION

(Responsables directos, red explosivos, colaboradores)



2. RED DEL 11-M Y DEL 11-S



a los que se considera responsables de los atentados: los autores materiales —los que colocaron las bombas, entre los que se encuentran los que mueren unos días después en la explosión del piso de Leganés—, junto a los autores o responsables intelectuales, los proveedores de explosivos y los colaboradores.

A pesar de que a menudo se considere que los responsables directos (autores materiales e intelectuales) formaban una "célula", la representación visual (*véase el gráfico1*) muestra que el sistema de relaciones no conforma una estructura cerrada y muy cohesionada (como sería una célula), sino una red algo desestructurada, con algunos actores desconectados, donde no todos ellos tienen relación directa entre sí.

En esta estructura relacional constatamos la existencia de una subestructura conectada y dos actores más bien aislados, que cuelgan relacionalmente de Jamal Zougam (que desempeña el papel clave de intermediación). En el centro destacan los actores más prominentes, también fuertemente relacionados entre sí, que configuran el corazón cohesionado de esta red: Jamal Ahmidan ("El Chino"), Jamal Zougam, Sarhane Ben Abdelmaid ("El Tunecino"), Mohamed Oulad y Abdenabi Kounjaa. Todos ellos, a excepción de Zougam, murieron en la explosión de Leganés.

A pesar de la prominencia de las relaciones intensas (trazado más grueso), es necesario apuntar la relevancia de las relaciones más débiles que conectan a varios actores (cinco) al centro de la red y que la consolidan en su forma actual. Resulta también clave que 12 de los 19 responsables directos estén ligados a la red islámica internacional (borde del círculo en color azul): todos los considerados responsables intelectuales y 7 de los 13 autores materiales. Este vínculo es fundamental como elemento de cohesión de los responsables directos del atentado.

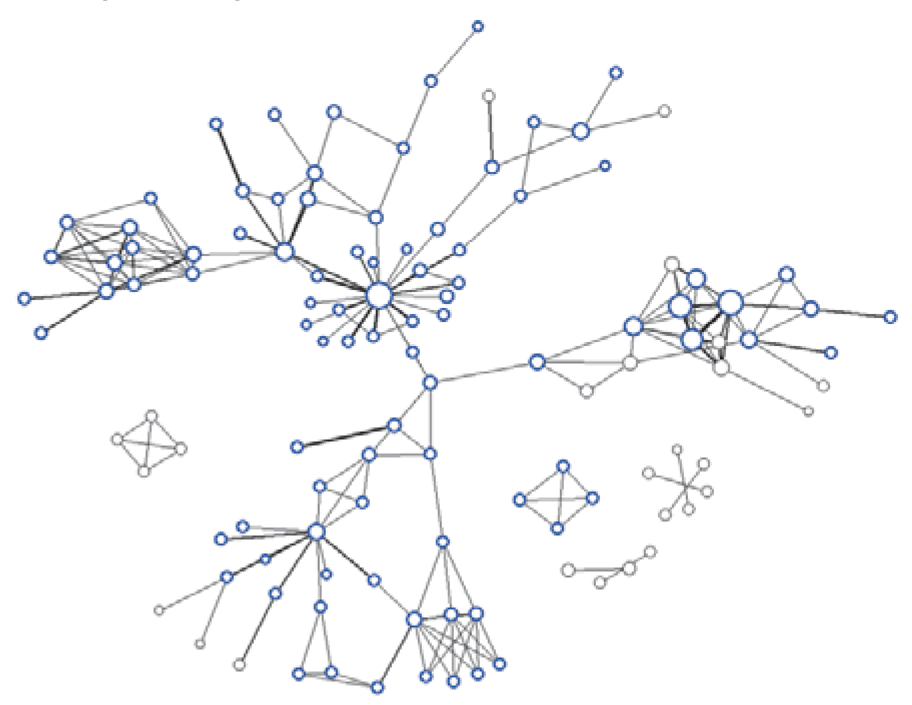
La red proveedora de explosivos (*círculos en amarillo*) está al margen de la red de responsables directos; se conecta a ella fundamentalmente a través de Suárez Trashorras y de Antonio Toro. La red de colaboradores (*en verde*) envuelve a los responsables directos de los atentados, aumenta la conexión entre ellos e intermedia con la red de explosivos (como hacen Rafá Zouhier y Rachid Adli).

La red completa de procesados e implicados se caracteriza por una densidad relacional baja y las relaciones de tipo débil y esporádico que conectan a casi todos los actores, mientras que las relaciones de confianza dejan a muchos actores desconectados. Es importante destacar el carácter local de la trama de colaboración y de provisión de explosivos frente al ligamen internacional de la red de acción.

La relación con la red internacional de Al Qaeda queda patente cuando

3. RED TOTAL

4. RED SIN 11-M Y 11-S



añadimos la red de procesados en el 11-S (*en magenta*, *véase el gráfico 2*). Existe una fuerte relación entre el actor central de la misma (Eddin Barakat, “Abu Dahdah”) y actores centrales de la red del 11-M (Jamal Zougam, Sharhane Ben Abdelmaid, Amer Azizi y Said Berraj). Todos ellos están, además, unidos por pertenecer a la red islámica radical que configura Al Qaeda.

Para poder explicar la existencia y viabilidad de la red del 11-M debemos pensar que esos actores no estaban solos, sino enmarcados en una red mucho más amplia. Será precisamente esa red más amplia (la “red total” que incluye todas las relaciones de los actuantes) la que dará lugar, la que posibilitará, la relación entre todos los actuantes. La red actuante es el producto de esa red total amplia.

La red total está compuesta por 202 personas y es una estructura más compleja, aunque menos densa, más dominada por relaciones poco intensas, que la red de acción (*véase el gráfico 3*). El corazón de la red total, la subestructura más fuertemente conectada y cohesionada, está formada por los actores centrales de las redes del 11-M y del 11-S. El resto de la red, subestructuras más simples y actores más aislados, actúa como envolvente de las redes de acción. En esta estructura envolvente dominan personas relacionadas con la red terrorista internacional; rodean completamente a la red del 11-S y parcialmente a la red del 11-M. Ello confirma el interesante carácter dual de la red del 11-M. Muy ligada a la red terrorista internacional Al Qaeda, que confiere a los atentados un carácter internacional, a la vez se sustenta en una red de actores locales que son los que posibilitarán su existencia y los atentados.

Cuando de la red total extraemos los actores que participan directamente en el atentado y los procesados en España por el 11-S, comprobamos que, aunque se reduce algo su densidad relacional y aumenta la distancia entre los actores, sigue existiendo. Sobrevive gracias a relaciones no intensas, lo que hace que resulte más difícil detectarla. Es una red menos compacta que la red total; visualizamos en ella claramente tres subestructuras conectadas entre sí por un único actor (*véase el gráfico 4*). La mayoría de los actores estarían relacionados con la red internacional Al Qaeda. Las relaciones indirectas entre estos actores crean una red invisible muy tupida y densa que la convierte en un sistema de retaguardia. Es el potencial de la red.

Algunas conclusiones

Los atentados terroristas del 11-M han puesto de manifiesto la importancia de nuevas formas organizativas: las redes. Estas son especialmente relevantes en casos de tramas u organizaciones secretas, como las terroristas. En principio son más difíciles de detectar, porque se basan más en la relación no intensa y débil. La red visible (la que actúa) es parte y producto de una red más amplia y difusa. Cuesta más detectar los contactos débiles, pero crean la red, y es precisamente partiendo de esta red difusa como se configura la red de acción. Estamos, por tanto, ante nuevo modelo organizativo no basado ya en una alta cohesión, o en una estructura jerárquica y de células. Es una red débil y, por tanto, menos visible y menos detectable. La red resulta de más fácil reconstrucción, pues no requiere de relaciones fuertes. En la debilidad reside su fortaleza.

La necesidad de efectividad en los atentados lleva a que en las relaciones entre los actores de la red de acción primen las relaciones intensas y repetidas, lo que les da mayor visibilidad y como resultado los hace más vulnerables. Aquí el poder se convierte en debilidad. La necesidad de supervivencia de la red, supuestamente secreta, se basa, por el contrario, en relaciones débiles y de tipo indirecto entre los actores. Esta red menos visible convierte a la debilidad en un elemento de poder. Es la paradoja de la debilidad y el poder.

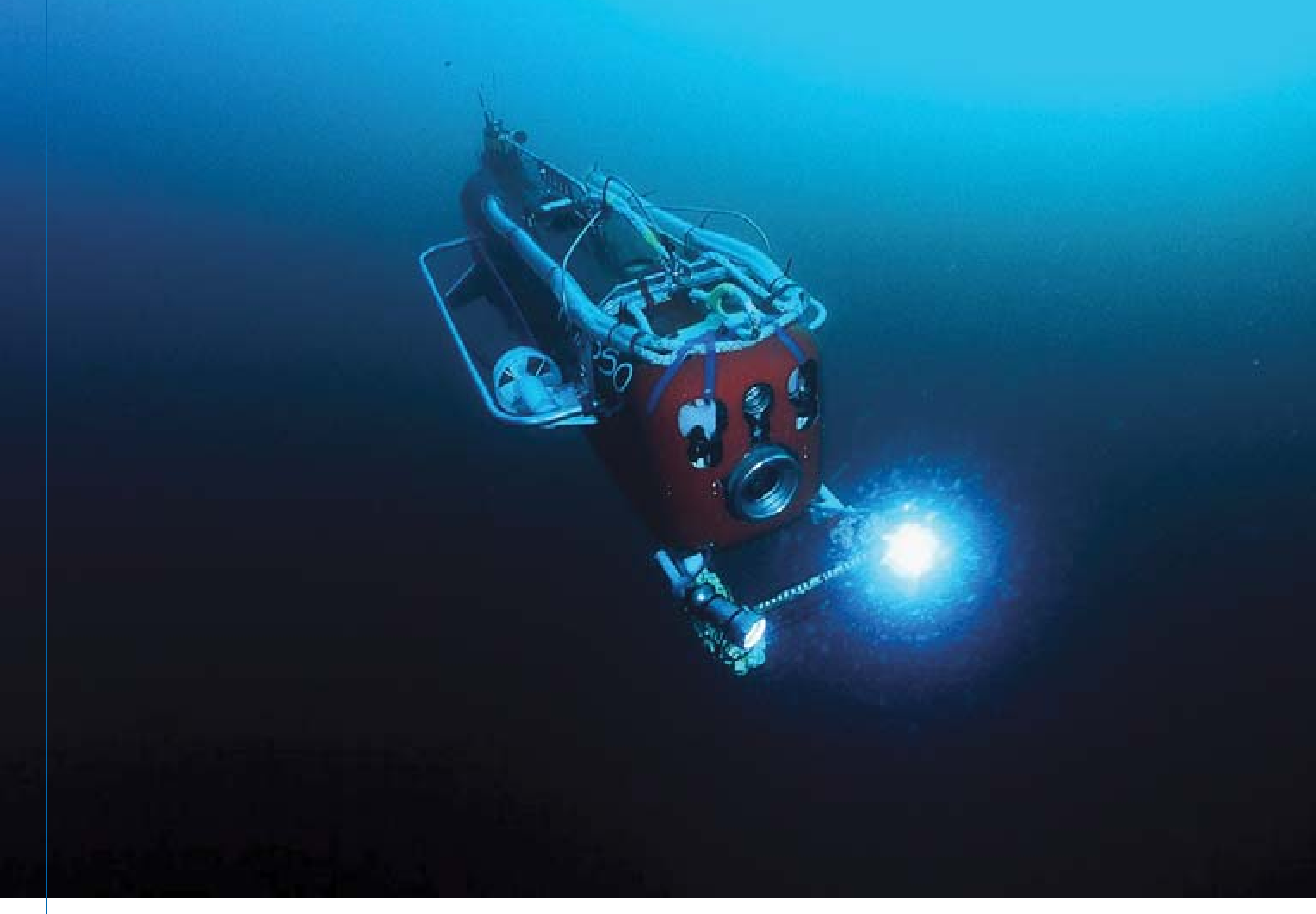
La red de acción se halla generada por la red amplia. La red amplia (total) crea esa subred de acción en un momento específico y puede crear otra subred en otro momento. Esta red amplia no actúa, pero hace posible la acción.

La red del 11-M muestra también una de las dualidades propias de la nueva sociedad: la relación global-local. La red de acción, y los actores más centrales, está fuertemente ligada a la red terrorista internacional, si bien se sustenta también en una red de carácter local.

José A. Rodríguez
Departamento de Sociología y Análisis de Organizaciones
Universidad de Barcelona

Dhugal Lindsay

Vida entre aguas



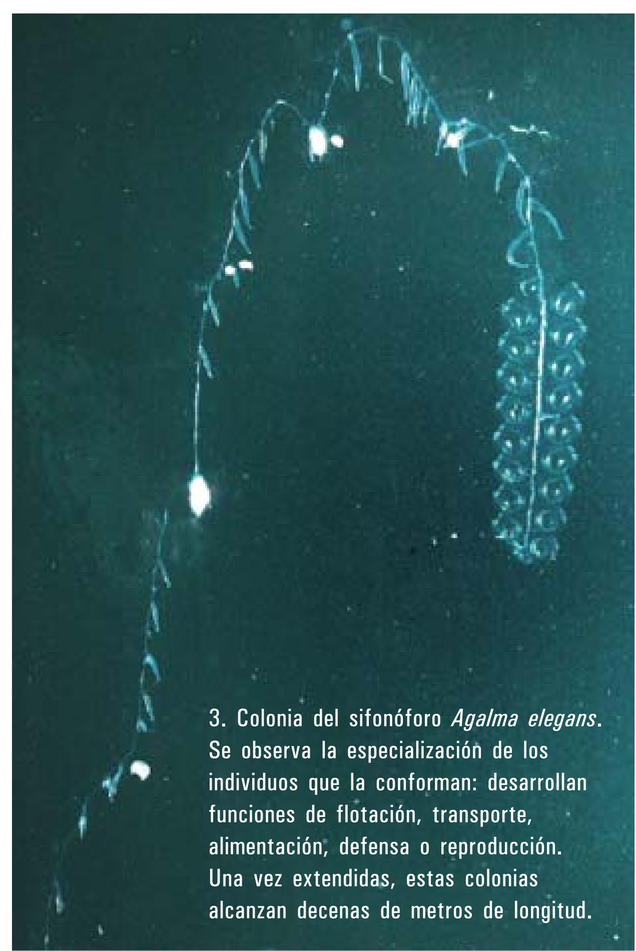
1. Sumergible PICASSO en aguas japonesas. Está equipado con cámaras de fotografía, de vídeo y varios sistemas para la recolección de organismos planctónicos.

Los océanos contienen unos 1348 kilómetros cúbicos de agua, que albergan cantidades ingentes de animales minúsculos, el plancton; flotan éstos arrastrados por las corrientes. Apenas si se conoce el 20 por ciento del volumen indicado. Por falta de conocimiento se pensaba que la vida macroscópica era allí muy escasa o incluso inexistente. Sin embargo, en el curso de los últimos veinte años las expediciones científicas que han explorado ese inmenso ecosistema han confirmado una riqueza insospechada de organismos planctónicos macroscópicos. Los hay solitarios. Otros forman enjambres, de tamaños muy dispares.

Para averiguarlo hubo que esperar el desarrollo de nuevas técnicas. No sirven los métodos tradicionales de estudio, basados en redes de plancton. Debido a su fragilidad, esos organismos se rompían en el interior de las redes. El desarrollo de cámaras fotográficas especiales ha permitido la filmación del organismo *in situ*, en su propio hábitat. El sumergible PICASSO (equipo autónomo de investigación con el sistema Operon) y otros vehículos submarinos se hallan preparados para la investigación de organismos gelatinosos (sifonóforos, ctenóforos y medusas) y otros hasta hace poco desconocidos. Esta aplicación de los avances técnicos a la exploración de los mares abre nuevos caminos en la investigación oceanográfica.



2. *Pandea rubra*. La fotografía *in situ* de esta medusa muestra su coloración y otras características morfológicas aún desconocidas.



3. Colonia del sifonóforo *Agalma elegans*. Se observa la especialización de los individuos que la conforman: desarrollan funciones de flotación, transporte, alimentación, defensa o reproducción. Una vez extendidas, estas colonias alcanzan decenas de metros de longitud.

4. *Eurhampaea vexilligera*, una especie muy frágil, poco abundante y excelente depredadora. Pertenece al grupo de los ctenóforos, uno de los que mejor se conoce merced a las nuevas técnicas de observación *in situ*.

La inflamación crónica, una respuesta inmunitaria que se manifiesta en las cardiopatías, la enfermedad de Alzheimer y otros trastornos, constituye quizás una pieza clave del proceso cancerígeno

Función maligna de la INFLAM

Hace más de 500 millones de años, un conjunto de enzimas y proteínas especializadas evolucionó para defender de los ataques externos a nuestros precursores. Si un microorganismo atravesaba el caparazón de algún animal del período Cámbrico, los elementos de ese primitivo sistema inmunitario ponían en marcha un ataque violento y coordinado contra el intruso (mediante la perforación de agujeros en sus paredes celulares, la emisión de toxinas químicas o, simplemente, la digestión y destrucción del enemigo entero). Tras haber acabado con los invasores, el batallón inmunitario empezaría a reparar las células atacadas o, en el caso de que estuviesen seriamente dañadas, eliminarlas.

Esa respuesta inmunitaria inflamatoria era tan eficaz, que se ha conservado buena parte de la misma en el curso de la evolución. Compartimos, en efecto, numerosos genes inmunitarios con la mosca de la fruta y otros organismos inferiores. Vertebrados e invertebrados divergieron a partir de un antepasado común hace más de 500 millones de años.

Conceptos básicos

- Hasta hace poco, la oncología reducía a las alteraciones génicas la causa del cáncer.
- En el curso de los últimos diez años, los expertos se han percatado de que un tumor en desarrollo recluta al componente inflamatorio del sistema inmunitario —que interviene en la cicatrización de heridas— para promover la carcinogénesis.
- Una nueva generación de fármacos antiinflamatorios podría combinarse con la quimioterapia habitual. Se mantendrían confinados en un foco a los tumores sólidos y a los tejidos premalignos.

Durante años, los inmunólogos han prestado escasa atención a ese rudimentario sistema inmunitario innato. Se centraban en el sistema inmunitario adaptativo, más avanzado: comanda los anticuerpos y otros tipos de armamento para que identifiquen y luego ataquen al intruso con una selectividad de la que carece el bronco sistema inmunitario innato.

Pero en los últimos 15 años, la inmunidad innata ha saltado a la palestra. La inflamación, su característica distintiva, se considera una de las alteraciones omnipresentes en las enfermedades crónicas, una lista que, amén de la artritis reumatoide y la enfermedad de Crohn, incluye la diabetes, la depresión y trastornos con un índice de mortalidad elevado, como las cardiopatías y el accidente cerebrovascular. La presencia en esa lista de una tercera enfermedad mortal, el cáncer, ha sido objeto de intensa investigación en estos últimos diez años. La relación entre inflamación y cáncer se sitúa hoy en el centro de atención.

En ese cambio de enfoque, que Robert A. Weinberg, del Instituto Whitehead de Investigación Biomédica del Instituto de Tecnología de Massachusetts, aborda en *The Biology of Cancer*, la inflamación opera como un mediador fundamental en las etapas intermedias del desarrollo tumoral. El cáncer comienza con una serie de cambios genéticos que instan la replicación desaforada de determinadas células, para invadir luego el tejido circundante, momento en que se inicia el proceso maligno propiamente dicho. Andando el tiempo, algunas células tumorales se desprenden y establecen nuevos focos de crecimiento en puntos distantes (metástasis).

Ese proceso cancerígeno se conoce desde hace tiempo. Pero los oncólogos y los inmunólogos se han percatado de que la progresión desde un tejido enfermo hasta un tumor invasivo totalmente desarrollado requiere, con frecuencia, que las células que intervienen en la cicatrización de cortes y arañazos se desvíen hacia las



ACION

GARY STIX

inmediaciones del tejido premaligno; allí secuestradas, acaban convertidas en cómplices de la carcinogénesis. En imagen de algunos expertos, la lesión genética vendría a ser la cerilla que enciende el fuego y la inflamación el combustible que lo alimenta.

Los libros de texto deben, pues, actualizarse. Un tumor no corresponde sólo a un montón de células aberrantes; requiere también de un sistema de apoyo, un microentorno tumoral que incluya diversos tipos de células inmunitarias, las señales químicas que intercambian entre ellas y una red de capilares sanguíneos. El tumor se comporta como un órgano al margen de la ley: no se dedica a bombear sangre o a liberar el cuerpo de toxinas; sirve sólo a sus propios fines.

Según ese nuevo enfoque, ya no sería necesaria la extirpación de todas y cada una de las células cancerosas del organismo. Antes bien, una terapia basada en antiinflamatorios evitaría que las células premalignas se tornaran cancerosas o impediría que un tumor ya constituido se extendiera a lugares lejanos del organismo. De ese modo, los pacientes de cáncer podrían sobrevivir, al igual que los pacientes de sida, que han visto aumentada su esperanza de vida merced al desarrollo de

En algunos tipos de cáncer, el desarrollo tumoral progresa a través de una inflamación urente, en la que el tumor recluta a las células inmunitarias que permanecen alrededor o en el interior de la masa maligna.

JEFF JOHNSON *Hybrid Medical Animation*



LOS PROTAGONISTAS

El sistema inmunitario consta de dos ramas principales: la división innata, que forma una primera línea de defensa contra los patógenos, y la división adaptativa, que se dirige con mayor especificidad hacia los invasores.

INNATO



MACROFAGO
Engulle y destruye a los invasores patógenos.



MASTOCITO
Libera histamina y otras sustancias que promueven la inflamación.



GRANULOCITO
Hay tres tipos de célula con gránulos diminutos en su interior: neutrófilos, eosinófilos y basófilos; todos participan en la respuesta inflamatoria.

CELULA DENDRITICA
Presenta antígenos —fragmentos de proteínas o de otras moléculas de los patógenos o de las células cancerosas— a las células del sistema inmunitario adaptativo. Con ello, las células se sienten inducidas a actuar contra quienes portan los antígenos.

CELULA ASESINA NATURAL
Destruye las células propias del organismo que han resultado infectadas por patógenos; persigue también a las células cancerosas.

ADAPTATIVO

CELULA B
Los antígenos estimulan a la célula B para que se divida y produzca anticuerpos que neutralicen a los invasores o para que los marque facilitando su destrucción.

CELULA T
Las células T asesinas destruyen a las células infectadas en las que detectan la presencia de antígenos. Otros tipos de células T (las coadyuvantes y las reguladoras) coordinan la respuesta inmunitaria.

nuevos fármacos. El objetivo ya no sería necesariamente la cura, abunda Lisa M. Coussens, de la Universidad de California en San Francisco, para quien, sería todo un éxito controlar la enfermedad y alargar la vida del paciente hasta su período natural.

Inmunidad innata y adaptativa

Para explorar los vínculos entre inflamación y cáncer, debemos exponer primero la forma en que operan las defensas del cuerpo; e indicar por qué, cuando la inflamación se prolonga durante un tiempo excesivo, se altera el mecanismo normal de cicatrización y se torna tumorigénico. Si pisamos un clavo, las bacterias que invaden la planta de nuestro pie instan la presencia inmediata de proteínas y leucocitos. Por botón de muestra: alrededor de 20 proteínas del complemento (llamadas así porque complementan a otros mecanismos de defensa) vierten compuestos químicos sobre los patógenos hasta que explotan y dejan una suerte de revoltijo protoplásmico. Conforme el sistema del complemento allana el camino, un ejército de fagocitos, expertos en ingestión celular, empieza a trabajar.

Esos macrófagos y neutrófilos no tardan en engullir a los huéspedes no invitados. La brigada de ataque incluye también a las células asesinas naturales: los mastocitos y los eosinófilos. La cicatrización no consiste sólo en desplegar una ofensiva contra los invasores. Las plaquetas sanguíneas involucradas en la formación de coágulos se desplazan a la zona de la herida cutánea, procedentes de una capa más profunda, repleta de vasos sanguíneos. Las enzimas dirigen la reparación de la matriz extracelular, el cemento proteínico que fija las células. Se forma una costra, la piel vuelve a crecer y el proceso de inflamación se detiene. En ocasiones, sin embargo, la inflamación prosigue. Cualquier tejido (no sólo la piel) que sufre inflamación crónica a causa de la presencia persistente de patógenos, toxinas o lesiones génicas estimula la patogénesis, de la enfermedad cardíaca al cáncer.

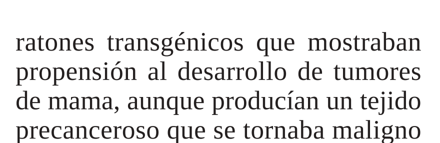
Además de esa primera línea de defensa, los vertebrados cuentan con un armamento adicional: el sistema inmunitario adaptativo. Este aprende a reconocer la identidad molecular de un invasor para utilizarla luego como diana y eliminarlo. Cumple desempeñar esa inmunidad selectiva a las células B, que producen anticuerpos capacitados para neutralizar a los patógenos o marcarlos para que sean destruidos; corresponde también a las células T, que instan a las células infectadas a suicidarse o a segregar compuestos químicos que dirigen la actividad de otros participantes en la respuesta inmunitaria.

En los últimos años se han ido acumulando numerosos datos que demuestran que la inflamación crónica desempeña una función clave en la progresión de algunos tipos de cáncer desde el estado premaligno hasta la enfermedad plenamente desarrollada.

La existencia de un nexo entre cáncer e inflamación se venía sospechando desde hacía tiempo. En 1863, Rudolf Virchow descubrió la presencia de “infiltraciones linforreticulares” (leucocitos) en el tejido maligno. En 1978, Alberto Mantovani, del Instituto Clínico Humanitas y de la Universidad de Milán, había observado que las células del sistema inmunitario innato tienden a congregarse alrededor de algunos tumores. Harold F. Dvorak, de la facultad de medicina de Harvard, destacó en 1986 que los tumores corresponden a “heridas que no cicatrizan”. El *statu quo*, sin embargo, se encuentra en otra parte. Hasta hace un decenio, numerosos biólogos aceptaban aún la idea de que el sistema inmunitario no sirve sólo para eliminar los patógenos, sino también para buscar y localizar células anormales precursoras del cáncer. Pero al estudiar más de cerca el microentorno tumoral, se descubrió algo inesperado.

Citoquinas y carcinogénesis

A finales del decenio de los noventa, Frances Balkwill, del Instituto del Cáncer Queen Mary de la Universidad de Londres, investigaba el factor de necrosis tumoral (FNT), una citoquina, es decir, una molécula señalizadora de tipo hormonal que participa en el sistema inmunitario. Cuando se administra a concentraciones elevadas directamente sobre un tumor, el FNT mata a las células cancerosas. Cuando está presente en el tumor a concentraciones bajas, aunque de forma crónica y persisten-



CONCEPTOS BASICOS SOBRE EL CANCER

Un proceso maligno, que puede durar años o decenios, se desarrolla en varias etapas.

INICIACION
Ciertas mutaciones hereditarias y la exposición a determinados compuestos químicos o a la radiactividad dan lugar a alteraciones génicas en una o más células.

PROLIFERACION
Las células del tejido premaligno empiezan a proliferar, a menudo en presencia de un estímulo inflamatorio. Su aspecto se aleja cada vez más de la normalidad.

PROGRESION
Las células tumorales empiezan a invadir el tejido circundante; cuando llegan a la sangre y a los nódulos linfáticos, el proceso maligno completa su desarrollo. Se pueden establecer metástasis en lugares remotos.

te, el FNT actúa de un modo muy distinto.

El grupo de Balkwill desactivó el gen *FNT* en unos ratones para que éstos fuesen incapaces de sintetizar la proteína. Para su sorpresa, los roedores no contraían tumores. Todos los expertos que estaban trabajando con el FNT pensando que se trataba de un agente anticancerígeno se quedaron de piedra: la citoquina de marras, que se consideraba antitumoral, operaba como un agente tumorigénico endógeno.

La facilidad con que se obtenían ratones *knockout*, en los que se podían estudiar los efectos de la desactivación selectiva de genes, ayudó a desentrañar el vínculo entre cáncer e inflamación. Coussens y sus colaboradores Douglas Hanahan y Zena Werb, de la Universidad de California en San Francisco, descubrieron en 1999 que los ratones transgénicos con genes cancerígenos activos, pero carentes de mastocitos (otro tipo de célula del sistema inmunitario innato), desarrollaban tejido premaligno que no progresaba hasta el estado maligno. En 2001, Jeffrey W. Pollard y su grupo, del Colegio Universitario Albert Einstein de Medicina, crearon ratones transgénicos que mostraban propensión al desarrollo de tumores de mama, aunque producían un tejido precanceroso que se tornaba maligno sólo en presencia de macrófagos.

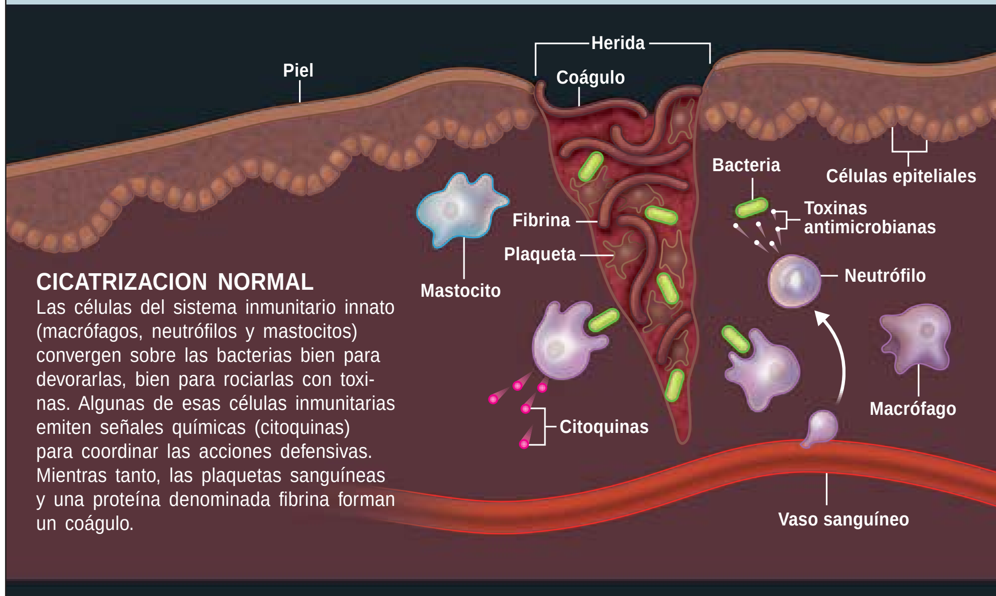
Esa nueva visión de la inmunidad no excluye la anterior. Se limita a sugerir que el sistema inmunitario opera como un arma de doble filo. Ese cañamazo de moléculas y células —superado en complejidad sólo por el cerebro— muestra un comportamiento paradójico: en unas ocasiones promueve el cáncer y en otras frena el avance de la enfermedad.

Las células asesinas naturales y otros tipos celulares del sistema inmunitario innato nos protegen contra el crecimiento tumoral. Otros tipos de células puede que alimenten un proceso maligno sólo cuando el microentorno se encuentra "polarizado" hacia un estado inflamatorio; en caso contrario, puede que lo eliminen. La inflamación, además, produce tumores en multitud de órganos, aunque no en todos (se desconocen su nexo con los cánceres de origen sanguíneo).

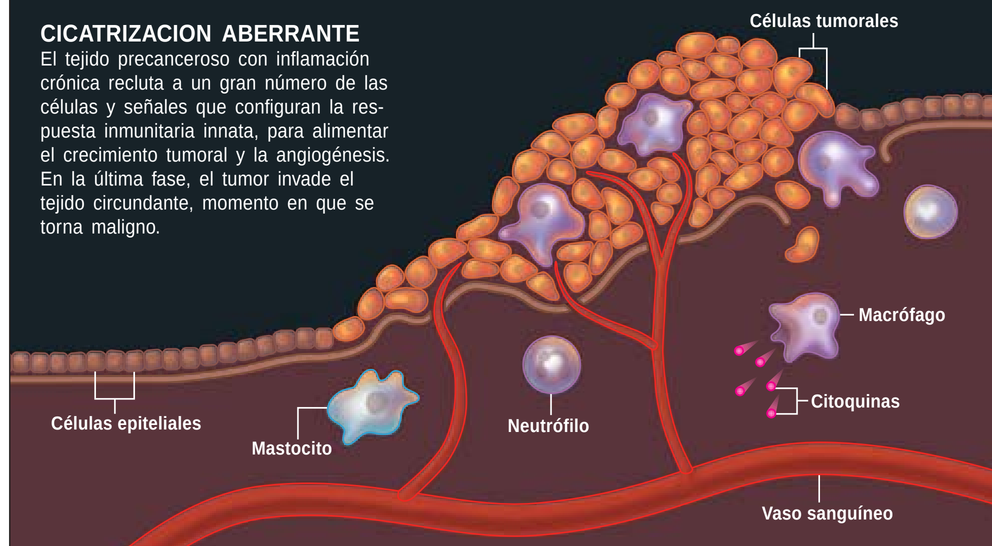
A la hora de buscar culpables de esa función tumorigénica, los in-

CUANDO LA CICATRIZACION PROMUEVE EL CANCER

El sistema inmunitario innato responde ante una agresión, así una herida punzante, con un arsenal celular y químico. Comenzamos a comprender el modo en que buena parte de esos agentes bioquímicos son utilizados por el tejido premaligno con inflamación crónica para promover el desarrollo del cáncer.



CICATRIZACION NORMAL
Las células del sistema inmunitario innato (macrófagos, neutrófilos y mastocitos) convergen sobre las bacterias bien para devorarlas, bien para rociarlas con toxinas. Algunas de esas células inmunitarias emiten señales químicas (citoquinas) para coordinar las acciones defensivas. Mientras tanto, las plaquetas sanguíneas y una proteína denominada fibrina forman un coágulo.

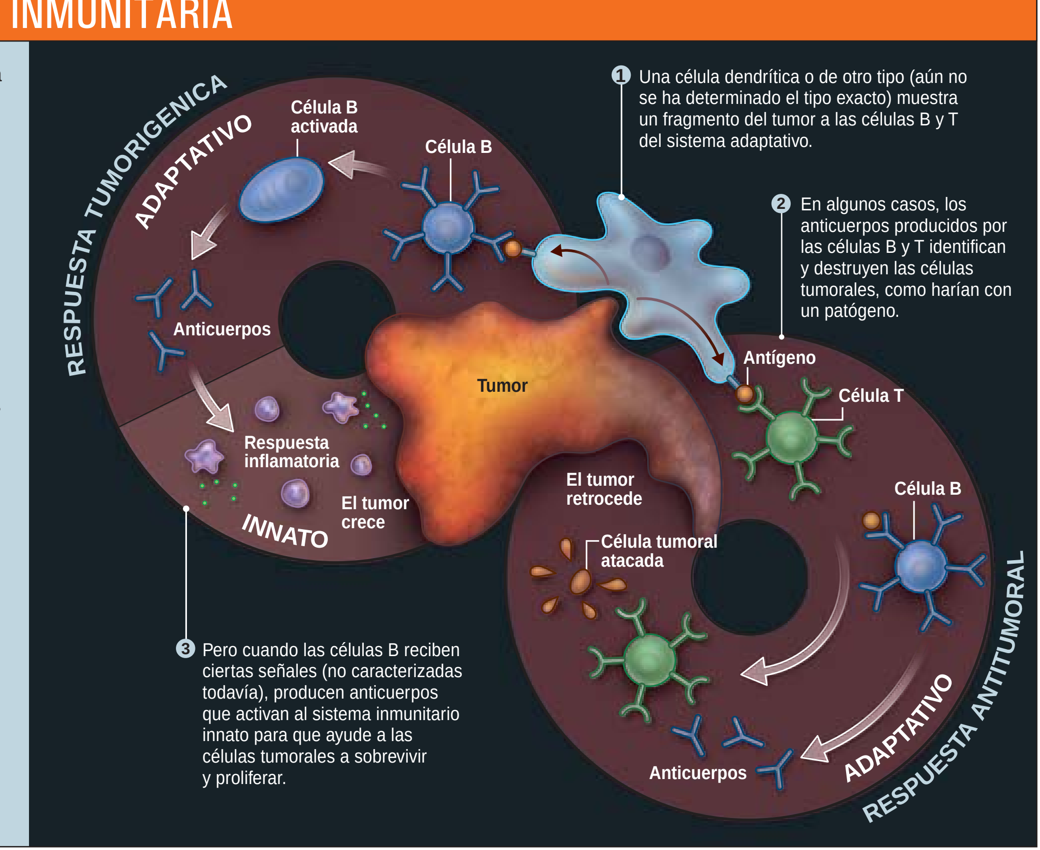


CICATRIZACION ABERRANTE
El tejido precanceroso con inflamación crónica recluta a un gran número de las células y señales que configuran la respuesta inmunitaria innata, para alimentar el crecimiento tumoral y la angiogénesis. En la última fase, el tumor invade el tejido circundante, momento en que se torna maligno.

JEN CHRISTIANSEN

LA PARADOJA INMUNITARIA

Las dos ramas del sistema inmunitario (la innata y la adaptativa) están exquisitamente adaptadas para luchar contra los patógenos. Pero su forma de combatir el cáncer resulta paradójica. El sistema innato proporciona una respuesta inflamatoria inicial ante una ofensiva microbiana mediante el ataque indiscriminado a cualquier patógeno invasor. El sistema inmunitario adaptativo proporciona una respuesta más tardía, aunque selectiva, dirigida contra un patógeno concreto. En caso de cáncer, ambos sistemas podrían atacar a las células tumorales. Pero el tumor se protege reclutando al sistema innato para que acelere el proceso canceroso.



JEN CHRISTIANSEN

vestigadores suelen enfocar el microscopio hacia los macrófagos, que ocupan una posición destacada entre los leucocitos presentes en el microentorno tumoral. Los macrófagos digieren y degradan células tumorales o envían una señal de alarma a las células T del sistema inmunitario adaptativo para indicarle que algo falla. Sin embargo, tal y como se demuestra en el trabajo de Pollard y otros investigadores, los macrófagos son “reeducados” por las células cancerosas para que se pongan a sus órdenes: se convierten en fábricas de citoquinas y factores de crecimiento tumorigénicos.

Esa “traición” comienza cuando las células tumorales emiten señales de ayuda para atraer a células que se convierten en macrófagos cuando alcanzan el tumor. En el interior de éste, las células proliferantes se desarrollan con celeridad tal, que empiezan a morir por falta de oxígeno. La hipoxia y los mensajes procedentes de las células tumorales inician un proceso mediante el cual los macrófagos recién llegados adoptan su nueva función tumorigénica. Esos amotinados que se congregan en los tumores, y a su alrededor, se denominan “macrófagos asociados a tumores”.

Se ha seguido la pista del proceso inflamatorio hasta el nivel de moléculas señalizadoras. En esa investigación se han recabado pruebas más sólidas en favor de la conexión con la carcinogénesis. En ese ámbito, el factor nuclear kappa B (FN-κB) corresponde a un complejo proteínico que opera a modo de interruptor general para la activación de los genes de la inflamación y para el control de la muerte celular. Se trata de una macromolécula archifamosa. David Baltimore y Phillip A. Sharp, merecedores del premio Nobel, la descubrieron y patentaron para utilizarla en el desarrollo de fármacos; una patente que se convertiría en objeto de pleitos multimillonarios.

En 2004, el grupo dirigido por Yinon Ben-Neriah y Eli Pikarsky, de la Universidad Hebrea de Jerusalén, preparó ratones transgénicos para que desarrollaran hepatitis (que puede causar cáncer de hígado). Los múridos contrajeron lesiones precancerosas que no avanzaron hasta el estado maligno cuando, mediante una alteración genética, se les privó de FN-κB, ni cuando se cortaba el suministro de la molécula señalizadora FNT, que promueve la inflamación. En ese último caso, un anticuerpo se unía a FNT y lo neutralizaba, pues impedía su unión con un receptor presente en las células premalignas del hígado. El bloqueo evitaba que el FNT desencadenase una cascada molecular que activara el interruptor para el FN-κB. La desactivación de FN-κB inducía a las células hepáticas precancerígenas a iniciar la apoptosis, o muerte celular programada.

Ese mismo año de 2004, en un hallazgo similar, Michael Karin y sus colaboradores, de la Universidad de California en San Diego, descubrieron que, en ratones modificados por ingeniería genética para que desarrollaran colitis (que provoca cáncer de colon), la inhibición de NF-κB inducía también la apoptosis. Asimismo, la desactivación de esa ruta en células inflamatorias, como los macrófagos, impedía el desarrollo del tumor.

Hasta la fecha, la prueba más clara en favor de una conexión entre cáncer e inflamación se encuentra en los datos que demuestran que, en



numerosos tipos de cáncer, la inflamación estimula la conversión del tejido precanceroso en un proceso maligno. Pero puede que la reacción inmunitaria intervenga también en la iniciación de la enfermedad y en el avance de la metástasis. Por citar un par de ejemplos, las infecciones con la bacteria *Helicobacter pylori* inducen una inflamación que incrementa de forma notable el riesgo de contraer cáncer de estómago; el virus de la hepatitis C puede provocar cáncer de hígado. Asimismo, los patógenos pueden generar radicales libres, que dañan el ADN.

Pero aunque la inflamación puede estar involucrada desde el inicio del proceso cancerígeno, por ahora son pocos los estudios que demuestran que un estado inflamatorio altera el ADN y proporciona la "chispa" que desencadena la malignidad.

Las pruebas a favor de la función metastásica de la inflamación son más sólidas. Estudios recientes respaldan tal hipótesis. El grupo de Karin publicó en la revista *Nature* del 5 de abril de este año de 2007 que la inflamación, y no alteraciones génicas en las células cancerosas, promovía la metástasis en ratones transgénicos aptos para desarrollar cáncer de próstata. La investigación sugería que una citoquina producida por las células inflamatorias próximas a un tumor de próstata determinaban que las células tumorales recortaran la síntesis de una proteína bloqueante de la metástasis. En opinión de Karin, ese resultado quizás explique un fenómeno hasta la fecha desconcertante: en ocasiones, la extracción de tejido tumoral (como la que se practica en una biopsia de próstata) favorece la metástasis. Según esa hipótesis, la inflamación que provoca la intervención sería la culpable.

Casi al mismo tiempo, el grupo de Pollard publicó en la revista *Cancer Research* otro estudio con múridos. Observaron que los macrófagos acompañan a las células de un tumor de mama durante su migración hacia los vasos sanguíneos que las transportarán hasta lugares remotos, mientras envían mensajes químicos a sus compañeras.

Los estudios sobre la función tumorigénica de la inflamación se han centrado en el sistema inmunitario innato. Pero el sistema inmunitario adaptativo —células T y anticuerpos producidos por las células B que se dirigen contra moléculas específicas de las células invasoras— muestra también esa función dual: contribuye a la patología o lucha contra ella. Desde hace decenios vienen ensayándose inmunoterapias diseñadas para intensificar la respuesta de las células T contra el cáncer, aunque los resultados son, a menudo, desalentadores.

Más aún. En el nuevo cuadro que se empieza a pergeñar se nos revela un complejo intercambio de señales entre células inmunitarias innatas y células adaptativas, interacción que podría presentarse en el desarrollo de la enfermedad maligna. Los expertos en vacunas contra el cáncer deberían tener en cuenta esas relaciones a la hora de diseñar sus tratamientos. Según se demostró años atrás, los tumores de ovario producen una molécula señalizadora que atrae a las células T reguladoras, un subtipo de célula inmunitaria adaptativa responsable de apaciguar a otras células T.

En 2005, un grupo encabezado por Coussens, de la Universidad

El sistema inmunitario contra el cáncer

Los tumores tienden una emboscada al sistema inmunitario para promover su propio crecimiento y supervivencia. Pero ocurre también lo contrario. En ocasiones, los anticuerpos y las células T asesinas del sistema inmunitario adaptativo se dirigen contra las células cancerosas y las destruyen. Se busca aplicar esa doble función al desarrollo de nuevas terapias; los resultados obtenidos hasta la fecha distan de ser convergentes.

De entre los nuevos fármacos, los que más éxito han alcanzado son los anticuerpos monoclonales: anticuerpos idénticos dotados de capacidad para atacar un antígeno canceroso, un fragmento molecular que se aloja en la superficie de una célula cancerosa. Los anticuerpos monoclonales ofrecen, en general, una inmunoterapia "pasiva", pues se obtienen en cultivos celulares o en ratones y se inyectan en los pacientes, en vez de confiar su síntesis al sistema inmunitario del paciente.

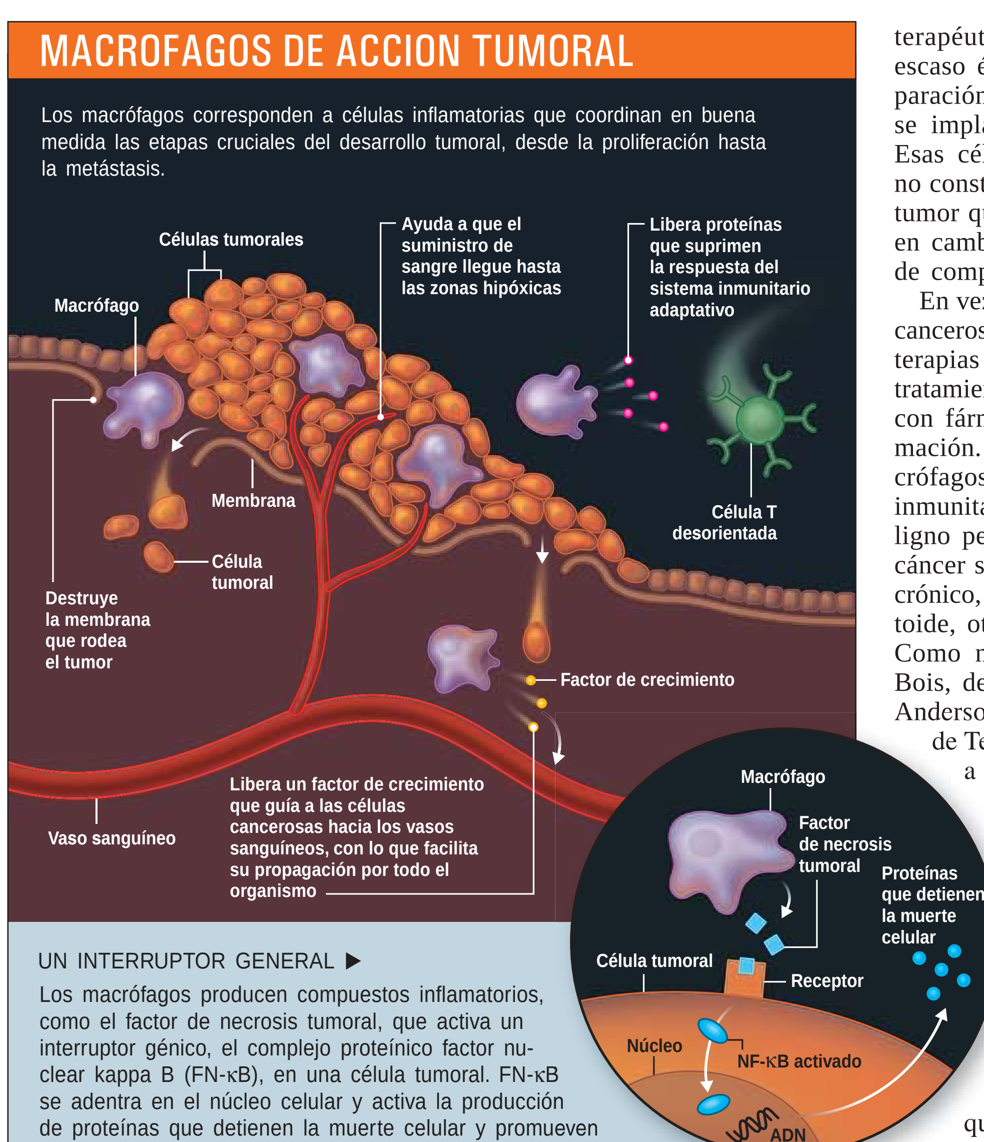
Las vacunas contra el cáncer —frustrado objetivo perseguido durante decenios— corresponden a terapias "activas". El paciente recibe una inyección de un antígeno, junto con otra molécula (adyuvante) que precipita una respuesta inmunitaria.

Los antígenos del cáncer son más difíciles de identificar que los de un patógeno, porque las células cancerosas corresponden a versiones mutantes de las propias células del organismo. El sistema inmunitario adaptativo no suele considerarlas foráneas, razón por la cual el tumor engaña al organismo para que desarme la respuesta inmunitaria.

Tras centenares de intentos fallidos —no se ha hallado ninguna prueba de que las vacunas provoquen la regresión de los tumores—, el concepto de una vacuna contra el cáncer ha recibido sonadas críticas. Steven A. Rosenberg, del Instituto Nacional del Cáncer, recuerda que la administración de vacunas contra el cáncer provoca, en ocasiones, una reacción de las células T contra las vacunas, aunque demasiado débil para frenar el desarrollo tumoral. El grupo que dirige Rosenberg ha optado por una estrategia distinta: la transferencia de células adoptadas, fundada en la extracción de leucocitos del organismo, de los que se seleccionan las células T dirigidas contra tumores. Estas se hacen crecer luego en el laboratorio y se reintroducen en pacientes cuyo sistema inmunitario se ha reprimido mediante fármacos. En un estudio publicado en 2005 en *Journal of Clinical Oncology*, la mitad aproximada de los 35 pacientes con melanoma tratados vieron cómo su tumor metastásico entraba en regresión, al menos parcial.

Mas parece renacer la esperanza de una vacuna contra el cáncer. En abril de 2007, se presentaron en la Asociación Americana para la Investigación sobre el Cáncer informes preliminares positivos sobre vacunas contra el cáncer de mama, próstata y de cabeza y cuello. En mayo, sin embargo, llegaron malas noticias: la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos (FDA) retrasó la aprobación de la que hubiese sido la primera vacuna contra el cáncer en los EE.UU., formulada contra el cáncer de próstata por la empresa Dendreon, con sede en Seattle.

Quizá sea posible adiestrar el sistema inmunitario del propio paciente para combatir el cáncer. La consecución de ese objetivo dependerá de nuestra comprensión del sistema inmunitario: un arma de doble filo, capaz de fomentar el desarrollo del cáncer y de bloquear la progresión del mismo.



MACROFAGOS DE ACCION TUMORAL

Los macrófagos corresponden a células inflamatorias que coordinan en buena medida las etapas cruciales del desarrollo tumoral, desde la proliferación hasta la metástasis.

UN INTERRUPTOR GENERAL ▶

Los macrófagos producen compuestos inflamatorios, como el factor de necrosis tumoral, que activa un interruptor génico, el complejo proteínico factor nuclear kappa B (FN-κB), en una célula tumoral. FN-κB se adentra en el núcleo celular y activa la producción de proteínas que detienen la muerte celular y promueven la inflamación y la proliferación celular.

JEN CHRISTIANSEN

de California en San Francisco, publicó en la revista *Cancer Cell* un estudio sobre la función de las células B. Descubrieron que la eliminación de las células B productoras de anticuerpos en ratones transgénicos propensos al cáncer de piel evitaba las alteraciones del tejido y la angiogénesis requeridas para el avance de la enfermedad. En su función defensiva normal, los anticuerpos producidos por las células B circulan por el torrente sanguíneo y marcan virus y bacterias para que sean destruidos por las células del sistema inmunitario de alerta precoz. Sin embargo, en respuesta a una señal procedente del tejido precanceroso, los anticuerpos activan la función tumorigénica del sistema inmunitario innato. Se desconoce todavía el modo en que da comienzo ese proceso.

Quizás una célula cancerosa envíe una señal a las células del sistema inmunitario innato o a las dendríticas, que activarían luego a las células B. En la señalización podrían participar receptores de tipo Toll, intermediarios destacados en el envío de señales del sistema inmunitario innato [*véase* “El sistema inmunitario de alerta precoz”, por Luke A. J. O’Neill; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 2005].

Bloqueadores del cáncer

El reconocimiento de que el cáncer guarda mayor semejanza con un órgano que con un amasijo de células mutantes quizás explique por qué algunos de los enfoques quimioterapéuticos anteriores han tenido escaso éxito. Se basaban en la preparación de cultivos celulares, que se implantaban luego en animales. Esas células se desarrollaban, pero no constituían tejidos complejos. Un tumor que aparece de forma natural, en cambio, corresponde a un tejido de complejidad extraordinaria.

En vez de limitarse a matar células cancerosas (el objetivo de las quimioterapias y radioterapias actuales), los tratamientos podrían complementarse con fármacos que frenaran la inflamación. Sin la intervención de macrófagos y otras células del sistema inmunitario innato, el tejido premaligno permanecería bajo control. El cáncer se convertiría en un trastorno crónico, semejante a la artritis reumatoide, otra enfermedad inflamatoria. Como nos recuerda Raymond DuBois, del Centro Oncológico M. D. Anderson adscrito a la Universidad de Texas, pocos pacientes mueren a causa de un cáncer primario. La muerte suele llegar con la metástasis.

El tratamiento farmacológico de la inflamación crónica ofrece una propuesta más atractiva para la lucha contra el cáncer que la destrucción indiscriminada de células malignas (e, inevitablemente, también de células sanas) que proponen las quimioterapias actuales. Suministrados por separado, esos medicamentos podrían ser lo bastante inocuos como para usarlos a diario como medida preventiva en pacientes de alto riesgo. Estudios clínicos y epidemiológicos sobre el uso de fármacos antiinflamatorios no esteroideos (NSAID) —la aspirina, por ejemplo— para evitar la aparición de algunos tumores sólidos han cosechado resultados alentadores. La investigación prosigue en busca de una forma más selectiva de bloquear la producción de prostaglandinas, las moléculas reguladoras cuya concentración disminuye por el efecto de los NSAID. En concreto, los fármacos que inhiben la producción de la prostaglandina E2 pueden frenar la inflamación y el crecimiento tumoral, al tiempo que evitan los efectos secundarios cardiovasculares de medicamentos como el Vioxx y los problemas gastroin-



UNA CAUSA COMUN

La inflamación crónica contribuye a un gran número de enfermedades, no sólo al cáncer.

CARDIOPATIAS
Los macrófagos, componentes del sistema inmunitario innato, son los protagonistas principales. Ingieren el colesterol “malo” (lipoproteínas de baja densidad) y luego se encapsulan formando un tapón fibroso que da lugar a la placa arterial; ésta se desprende y genera un coágulo que bloquea la arteria, con lo que provoca un infarto.

DIABETES
Cuando están expuestas al estrés metabólico que causa la obesidad, las células del sistema inmunitario innato y los adipocitos fabrican unas moléculas señalizadoras denominadas citoquinas, como el factor de necrosis tumoral. Esas moléculas interfieren con la función normal de la insulina y provocan diabetes.

ENFERMEDAD DE ALZHEIMER
Las células de la microglía, el equivalente neuronal de los macrófagos, expresan citoquinas y radicales libres que dañan las células, al tiempo que interaccionan con la proteína beta-amiloide que se acumula en las placas características de esta enfermedad. La inflamación resultante daña las neuronas.

DEPRESION Y ESQUIZOFRENIA
En pacientes con depresión se han detectado concentraciones elevadas de moléculas inflamatorias (interleuquina-6 y la proteína reactiva C). Algunas pruebas sugieren que existe una correlación entre la esquizofrenia y una concentración elevada de citoquinas.

testinales asociados a la generación anterior de NSAID [*véase* “Mejora de los analgésicos”, por Gary Stix; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 2007]. Se están también estudiando los efectos antiinflamatorios de las estatinas, que se utilizan para reducir el nivel de colesterol.

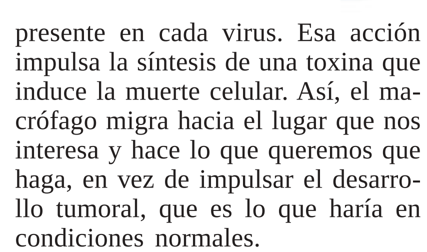
Hay tratamientos ya listos. El fármaco Avastin inhibe la producción del promotor de la angiogénesis VEGF, aunque los oncólogos deberían pugnar con otras moléculas del microentorno tumoral que promueven la formación de vasos. Los medicamentos desarrollados contra enfermedades inflamatorias más comunes pueden también combatir el cáncer; tales medicinas podrían combinarse en cócteles, a la manera de los preparados de interés en la terapia del sida, que cuentan también con inhibidores de la angiogénesis y agentes inductores de la muerte celular.

Se ha aprobado la utilización de los inhibidores de FNT en el tratamiento de la artritis reumatoide, la enfermedad de Crohn y otros trastornos; en la actualidad, se están llevando a cabo los ensayos clínicos para aplicarlos al tratamiento de tumores sólidos y cánceres de la sangre. El fármaco Rituxan, un anticuerpo monoclonal que reprime las células B en la artritis reumatoide y el linfoma de las células B, podría evitar la respuesta inflamatoria que favorece la formación de tumores sólidos. Otras citoquinas y moléculas emparentadas (IL-6, IL-8 y CCL2), así como NF-κB, constituyen dianas potenciales de la farmacoterapia.

Algunos compuestos, incluidos NSAID y uno que está presente en la cúrcuma, una especia, ejercen parte de sus efectos vía inhibición de NF-κB. Pero los principales laboratorios farmacéuticos están investigando inhibidores de esa molécula fundamental altamente selectivos; muchos de ellos operan sobre las enzimas que regulan la actividad de NF-κB (la I-κB quinasa, por ejemplo).

Un caballo de Troya químico

El grupo de Claire Lewis y Munitta Muthana, de la Universidad de Sheffield, se propone desarrollar un tratamiento más ambicioso todavía, una suerte de caballo de Troya molecular. Han diseñado un sistema para la administración de fármacos que aprovecha la atracción natural que muestran los macrófagos hacia las regiones hipóxicas de los tumores. Han modificado macrófagos por ingeniería genética para que liberen un virus terapéutico en esas zonas, que, debido a un aporte sanguíneo insuficiente, apenas responden a los tratamientos al uso, como la quimioterapia o la radioterapia. Una vez llegan al tumor (por ahora, desarrollado en cultivo), los macrófagos liberan miles de copias del virus, que infectan a las células cancerosas; luego, una proteína de esas células activa al gen terapéutico presente en cada virus. Esa acción impulsa la síntesis de una toxina que induce la muerte celular. Así, el macrófago migra hacia el lugar que nos interesa y hace lo que queremos que haga, en vez de impulsar el desarrollo tumoral, que es lo que haría en condiciones normales.



Los pormenores de un posible tratamiento antiinflamatorio contra el cáncer están aún por determinarse. La manipulación de nuestras defensas, por sutil que sea, acarrea sus propios riesgos. La desactivación del sistema inmunitario puede facilitar la aparición de infecciones oportunistas, como ocurre en el caso del sida. En otros trastornos inflamatorios, el uso de bloqueadores de FNT se ha relacionado con la tuberculosis y otras infecciones, incluso con un posible linfoma. Además, la inhibición de la ruta del NF-κB promueve el cáncer en algunos casos: una paradoja más. En ocasiones, la limitación de la producción de NF-κB provoca daños tisulares y da lugar a un proceso de regeneración anormal del tejido dañado que termina en cáncer.

Con todo, parece probable que una nueva generación de antiinflamatorios se una al armamentario quimioterapéutico. Las enfermedades crónicas, con sus estados inflamatorios subyacentes, son características de una población que envejece. Si en vez de tratar sólo las células mutantes se combatiera la inflamación que rodea al tumor, el cáncer se convertiría en una enfermedad con la que podríamos convivir.



Bibliografía complementaria

SMOLDERING AND POLARIZED INFLAMMATION IN THE INITIATION AND PROMOTION OF MALIGNANT DISEASE. Frances Balkwill, Kellie A. Charles y Alberto Mantovani en *Cancer Cell*, vol. 7, n.º 3, págs. 211-217; marzo de 2005.

DISTINCT ROLE OF MACROPHAGES IN DIFFERENT TUMOR MICROENVIRONMENTS. Claire E. Lewis y Jeffrey W. Pollard en *Cancer Research*, vol. 66, n.º 2, páginas 605-612; 15 de enero, 2006.

PARADOXICAL ROLES OF THE IMMUNE SYSTEM DURING CANCER DEVELOPMENT. Karin de Visser, Alexandra Eichten y Lisa M. Coussens en *Nature Reviews Cancer*, vol. 6, n.º 1, páginas 24-37; enero, 2006.

Evolución de los FELINOS

Las huellas genómicas en el ADN de los felinos salvajes de todo el mundo esclarecen el árbol genealógico de esta familia y revelan sus migraciones en el pasado

Stephen J. O'Brien y Warren E. Johnson

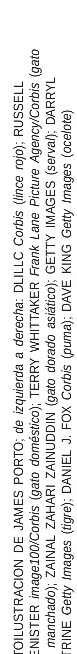
Conceptos básicos

- La historia evolutiva de los felinos persistía rodeada de misterio, dadas la escasez y semejanza de sus restos fósiles. Pero gracias a los avances en la investigación genómica se ha logrado construir el árbol genealógico de los félidos.
- Las pruebas de ADN demuestran que todos los felinos actuales descienden de un depredador parecido a la pantera, que medraba por el sudeste asiático hace 10,8 millones de años. Los grandes felinos rugientes fueron los primeros en diferenciarse unos de otros; más tarde, aparecerían otros siete linajes.
- Las fluctuaciones del nivel del mar favorecieron la colonización de nuevos continentes y la aparición de nuevas especies de felinos. En el Próximo Oriente se domesticó un gato salvaje y pequeño hace entre 8000 y 10.000 años.
- A pesar de su éxito evolutivo, la mayoría de los felinos, con excepción del gato doméstico, se halla hoy en peligro de extinción.

Elegantes y enigmáticos, los felinos no fascinan sólo a los que compartimos el sofá con sus representantes más pequeños, los gatos domésticos, sino también a los científicos que se han propuesto descifrar el origen y la evolución de los parientes de mayor tamaño. ¿En qué regiones del planeta evolucionaron los felinos actuales? ¿Por qué y cuándo abandonaron su hogar y emigraron a través de los continentes? ¿Cuántas especies existen? ¿Cuál es su parentesco?

Se admite que la familia de los félidos (*Felidae*) incluye 37 especies. Sin embargo, se han ofrecido docenas de esquemas de clasificación: las especies se agrupan desde sólo dos géneros hasta veintitrés. ¿Cuál es el más acertado? Las especies de felino guardan una estrecha semejanza entre ellas; todas muestran el aspecto de gatos de tamaño pequeño, mediano o grande. Distinguir el cráneo de un león del cráneo de un tigre constituye un auténtico desafío, incluso para el experto. Ni siquiera los estudios genéticos que hemos llevado a cabo en el curso de los últimos veinte años nos han permitido establecer una clasificación definitiva.

Sin embargo, se ha producido una revolución en la secuenciación genómica desde el Proyecto Genoma Humano y el desarrollo de potentes técnicas para el análisis



del ADN, que han aportado varios instrumentos extremadamente valiosos para la investigación. Haciendo uso de esas técnicas novedosas, los dos autores de este artículo, con la colaboración de otros expertos, hemos construido el árbol genealógico de la familia de los félidos.

Mediante la comparación de la secuencia del ADN de 30 genes en todas las especies actuales de felinos, hemos determinado las ramificaciones del árbol. Asimismo, a partir del registro fósil y mediante el método del "reloj molecular" (que permite estimar el momento en que divergieron unas especies de otras según la magnitud de las diferencias génicas), hemos recreado la cronología de tales bifurcaciones. El resultado ha proporcionado la primera descripción fiable del grado de parentesco entre felinos de todos los tamaños, a la vez que ha permitido discernir cómo y cuándo esos magníficos depredadores colonizaron los cinco continentes.

Ocho linajes

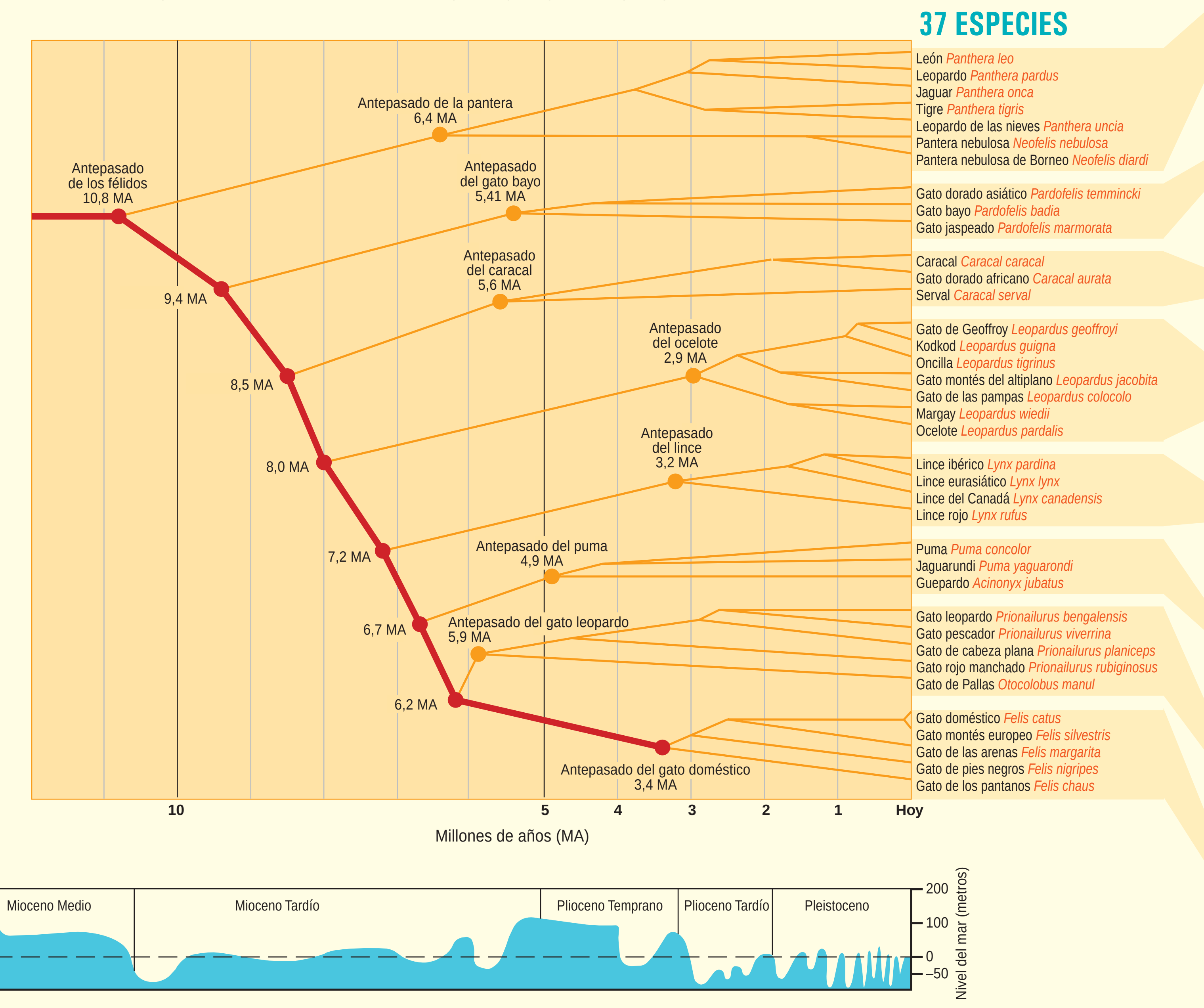
Los estudios de ADN parecían agregar las 37 especies en ocho grupos o "linajes". Descubrimos algo que nos resultó fascinante y estimulante a la vez: los ocho grupos definidos por análisis molecular concordaban con otros tipos de observaciones; por botón de muestra: especies de un mismo linaje compartían a menudo características morfológicas, biológicas y fisiológicas exclusivas de su grupo. Pensemos en el linaje que agrupa todos los felinos de gran tamaño rugientes: león, tigre, leopardo, jaguar y leopardo de las nieves. Lo que permite rugir a esos animales es la osificación incompleta del hioides, un hueso del cuello que sostiene la lengua. A ese grupo pertenecen también la pantera nebulosa y la pantera nebulosa de Borneo, unos felinos de tamaño medio poco conocidos, con un hermoso pelaje moteado; pero a ellas les impide rugir una estructura ósea en el cuello algo distinta.

La comparación entre secuencias génicas permitió identificar los linajes y establecer su orden de aparición; los fósiles revelaron la cronología de la evolución experimentada. Sin embargo, para completar el marco hipotético y averiguar dónde aparecieron los felinos y cómo llegaron a su distribución actual en todo el mundo, se necesitaron dos informaciones adicionales.

En primer lugar, determinamos la distribución actual de cada especie

EL ARBOL GENEALOGICO DE LOS FELINOS

Se compararon las secuencias genómicas de las 37 especies de felino para determinar las ramas del árbol. Los fósiles permitieron establecer las fechas en que se produjeron las principales ramificaciones.



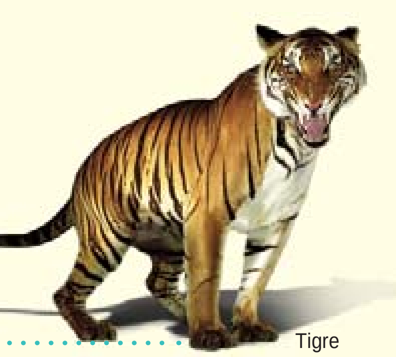
de felino y la zona donde medraron sus antepasados según el registro paleontológico. Aplicamos luego el conocimiento de los geólogos, que infieren el ascenso y descenso del nivel del mar a partir de la composición de los depósitos sedimentarios. Cuando el nivel del mar era bajo, los continentes estaban conectados por puentes de tierra que permitían a los mamíferos emigrar a nuevos territorios. Cuando el mar subió otra vez, los animales quedaron de nuevo aislados en los continentes. Los estudios de vertebrados demuestran que el aislamiento continental, o insular, crea las condiciones necesarias para que la constitución genética adquiera tal grado de diferenciación, que termine por no poder cruzarse con los descendientes contemporáneos de sus parientes antiguos; hablamos del distanciamiento reproductor que caracteriza al proceso de especiación.

Con esas piezas del rompecabezas, construimos una posible secuencia de las migraciones de los félidos a lo largo de la historia.

Según el registro fósil, el felino *Pseudaelurus*, que vivió en Europa hace entre 9 y 20 millones de años, corresponde al último antepasado común de los félidos contemporáneos. (*Pseudaelurus* no fue el primer felino; los felinos de gran tamaño con dientes de sable, o Nimrávidos, se

JANA BRENNING

CONCEPTOS BASICOS



Tigre

❶ PANTERA

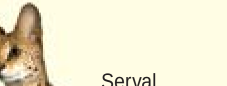
Estos felinos de tamaño mediano a grande (de 15 a 350 kilogramos) se hallan distribuidos por todo el planeta. Son los depredadores dominantes en los ecosistemas y continentes que habitan; suelen especializarse en ungulados de gran tamaño. El león, el tigre, el jaguar, el leopardo y el leopardo de las nieves presentan el hiodes con osificación incompleta, lo que les permite rugir. Las dos especies de pantera nebulosa, en cambio, no rugen.

❷ GATO BAYO

Este grupo poco conocido de felinos de tamaño reducido a mediano (de 2 a 16 kilogramos) se circunscribe a la selva subtropical del sudeste asiático. Antes de los análisis genéticos realizados por los autores, los taxónomos no clasificaban a esas especies en el mismo grupo.



Gato dorado asiático



Serval

❸ CARACAL

Felinos de tamaño mediano (de 5 a 25 kilogramos). Medran en Africa; pese a su fácil identificación, no solían incluirse en un mismo grupo antes del estudio genético de los autores.

❹ OCELOTE

Felinos de tamaño reducido a mediano (1,5 a 16 kilogramos). Ocupan hábitats muy dispares lo mismo en Centroamérica que en Sudamérica. Presentan un número distinto de cromosomas con respecto a otras especies de félidos (36 en vez de 38).

Ocelote



❺ LINCE

De tamaño mediano (de 6 a 20 kilogramos), estos felinos se caracterizan por una cola corta y orejas puntiagudas. Se distribuyen en los climas templados de Norteamérica y Eurasia. Tienden a especializarse en la depredación de liebres y conejos. A excepción del lince ibérico, esas especies se cuentan entre las más explotadas para la comercialización de su piel.



Lince rojo

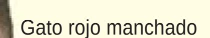
❻ PUMA

Linaje plural, que abarca del pequeño jaguarundi (de 3 a 10 kilogramos) al poderoso guepardo (de 21 a 65 kilogramos); tiene su origen en Norteamérica, si bien se dispersó por cuatro continentes. Conserva todavía una distribución amplia. Los pumas son comunes en algunas zonas; se cazan de forma legal en determinados puntos de su territorio.

Puma
(león de montaña)

❼ GATO LEOPARDO

De tamaño reducido (de 2 a 12 kilogramos), ocupan una amplia variedad de hábitats en Asia, desde el manglar hasta la estepa de Mongolia. El gato leopardo es el felino pequeño más común de Asia.



Gato rojo manchado

❽ GATO DOMESTICADO

Felinos de tamaño reducido (de 1 a 10 kilogramos). Presentan una distribución africana y eurasiática, a excepción del gato doméstico, que se halla extendido por todo el mundo.



Gato doméstico

FOTOILUSTRACION DE JAMES PORTO

remontan 35 millones de años atrás, pero casi todos sus descendientes se extinguieron.)

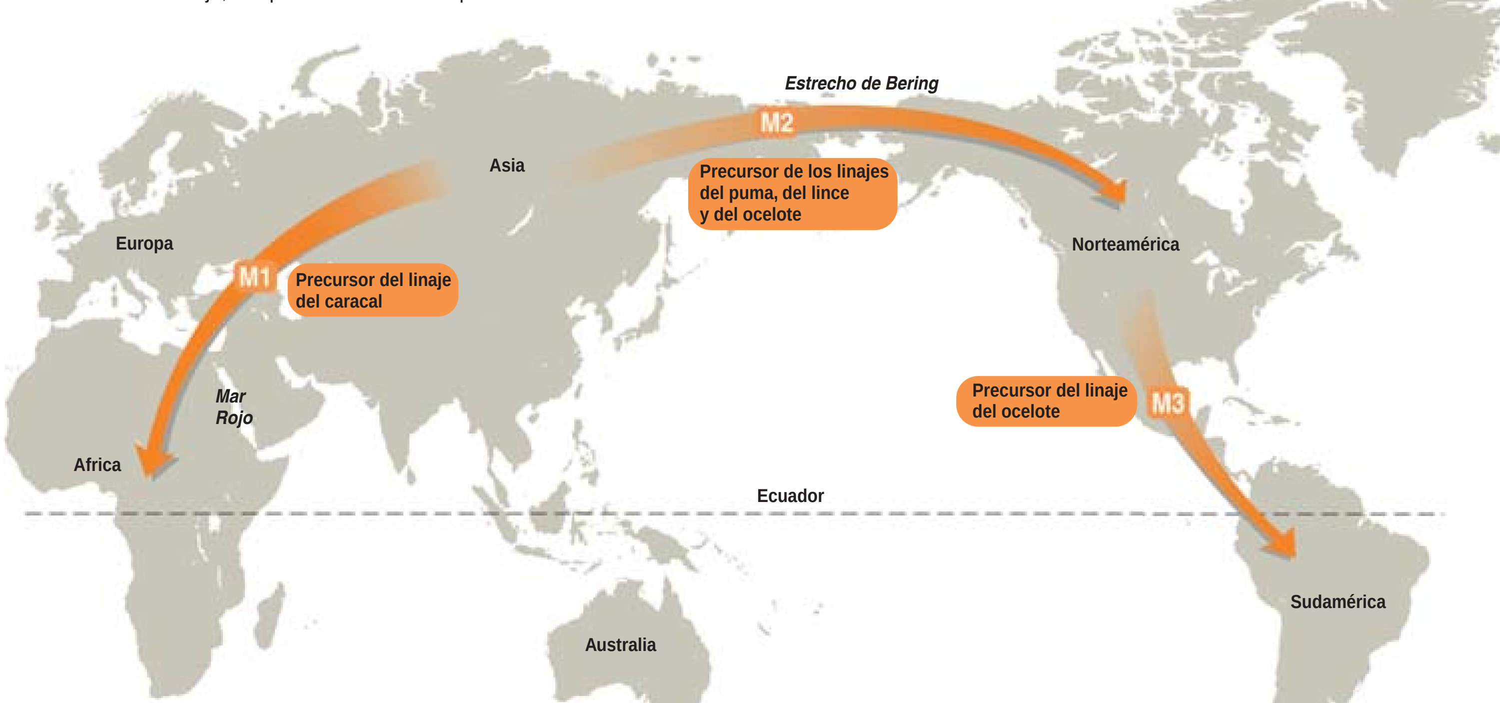
Nuestras investigaciones moleculares indican, sin embargo, que todos los felinos contemporáneos descienden de una de las especies de *Pseudaelurus* que medraron en Asia hace unos 11 millones de años. Aunque no sabemos con certeza a qué especie exacta correspondía ese antepasado, creemos que el grupo antiguo incluyó los progenitores originarios de las 37 especies actuales de félidos.

Migraciones

El primer grupo divergió de ese felino asiático misterioso hace unos 10,8 millones de años. Inauguró el linaje Panthera ❶, que comprende en la actualidad a los felinos rugientes de gran tamaño y a las dos especies de pantera nebulosa. Una segunda división, unos 1,4 millones de años

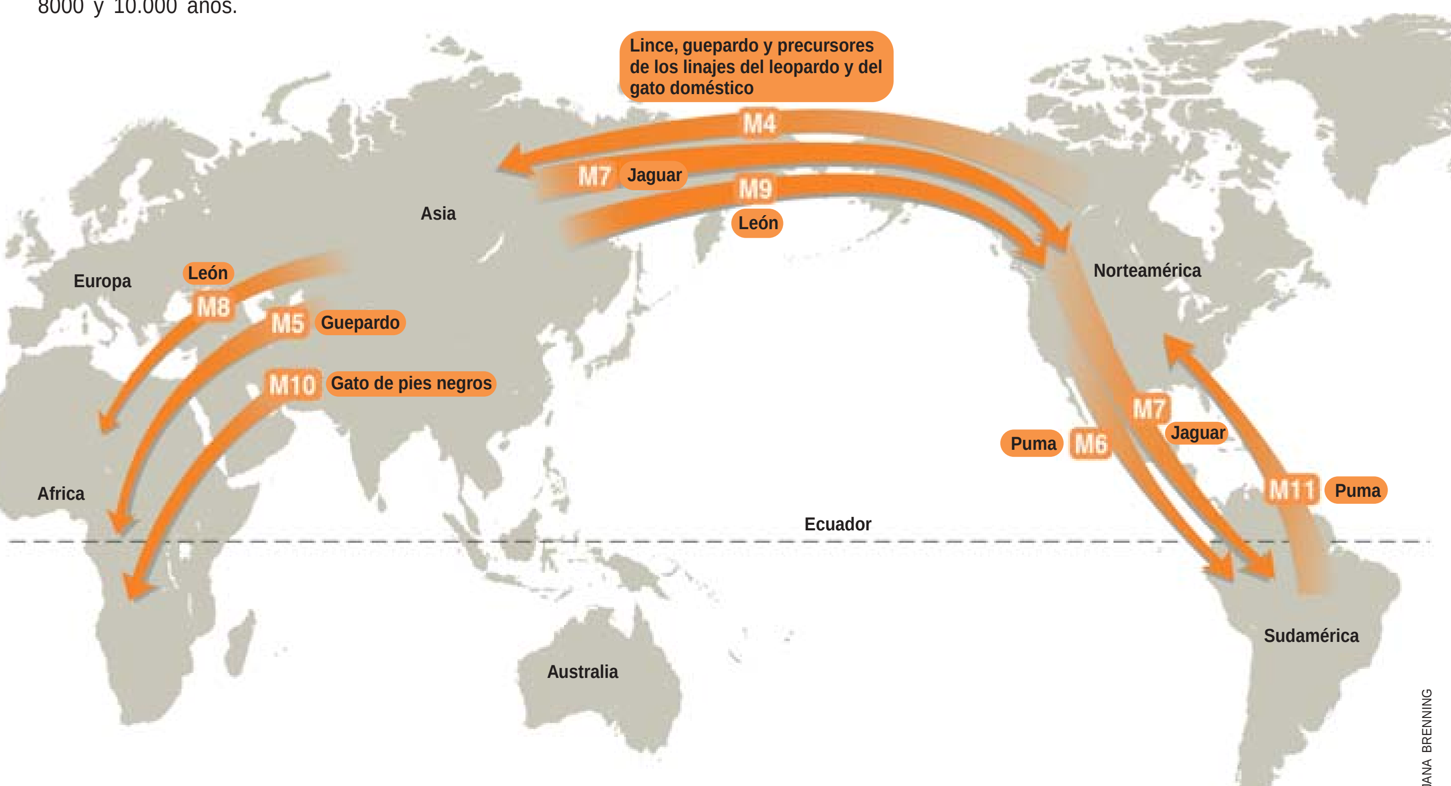
Primera ola de migraciones

Hace unos nueve millones de años, los descendientes del antepasado de todos los felinos contemporáneos (un depredador parecido a la pantera) comenzaron a emigrar desde su hogar en Asia hacia África M1 y Norteamérica M2 (y más tarde hacia Sudamérica M3). El nivel del mar era extraordinariamente bajo durante ese período; ello facilitó el establecimiento de "puentes" de tierra a través del estrecho de Bering y de los extremos norte y sur del Mar Rojo, lo que favoreció el desplazamiento de los felinos.



Segunda ola de migraciones

Muchas otras migraciones se produjeron hace entre un millón y cuatro millones de años, cuando el bajo nivel del mar volvió a poner en conexión a los continentes. La migración más reciente del puma M11 tuvo lugar hace entre 8000 y 10.000 años.



JANA BRENNING

más tarde, también en Asia, dio lugar al linaje del gato bayo ❷, hoy en día integrado por tres felinos pequeños que evolucionaron y residen todavía en el suroeste asiático. La siguiente ramificación del grupo original fundó el linaje del caracal ❸, representado en el presente por tres especies de tamaño mediano, cuyos progenitores se desplazaron hacia Africa hace de 8 a 10 millones de años, emprendiendo la primera migración intercontinental. Durante ese período, el mar descendió 60 metros por debajo de su nivel actual; Africa y la península Arábiga quedaron conectadas mediante puentes de tierra en ambos extremos del mar Rojo, lo que facilitó la emigración hacia Africa.

Los felinos emigran por instinto. Una vez alcanzan la adolescencia, los machos jóvenes, y en ocasiones las hembras, se ven impulsados a abandonar el área natal. Así, a largo plazo, las poblaciones de felinos en desarrollo necesitan cada vez más territorio para su expansión. Ese comportamiento innato, junto con la necesidad de seguir a las especies presa que migraban, explicaría que los felinos hubieran llegado a todas partes. Además, son unos excelentes depredadores; aprovechan la mínima oportunidad para adentrarse en nuevos territorios. No debe sorprendernos, pues, que se introdujeran con éxito en regiones inexploradas.

Durante el mismo período en que los felinos asiáticos comenzaron a extenderse por Africa, se dispersaron también por Asia y atravesaron el puente terrestre de Bering hasta Alaska. Cuando los felinos ya colonizaban Asia, Europa, Africa y Norteamérica, el nivel del mar ascendió; se separaron los continentes. Con el aislamiento y la modificación de los hábitats, evolucionaron una veintena de nuevas especies. En Norteamérica, los linajes del ocelote ❹ y del lince ❺ se separaron de los nómadas originales hace 8 y 7,2 millones de años, respectivamente. El linaje del ocelote se dividió a la larga en dos especies; el otro grupo dio lugar a cuatro especies de lince. El linaje del puma ❻ divergió hace 6,7 millones de años: aparecieron el puma (también denominado cougar o león de montaña), el jaguarundi y el guepardo americano. Los restos fósiles de todas esas especies en los materiales sedimentarios permiten determinar su origen en el hemisferio occidental.

Hace entre dos y tres millones de años, un nuevo período glacial hizo retroceder de nuevo a los océanos; asimismo, se produjeron desplazamientos de masas continentales que conectaron los dos continentes americanos a través del istmo de Panamá. Algunos felinos de aquella época aprovecharon la oportunidad de emigrar y se dirigieron hacia el sur; allí encontraron un continente sin carnívoros placentarios (osos, cánidos, felinos, mofetas, etcétera). Sudamérica se había mantenido aislada de los continentes septentrionales durante decenas de millones de años; se encontraba habitada por numerosas especies marsupiales, entre ellas algunas variedades carnívoras. Pero cuando llegaron los felinos a través de Panamá, se convirtieron rápidamente en los depredadores finales: de gran tamaño, veloces, diestros, feroces y mortales. Los carnívoros marsupiales, más modestos, no podían competir. En poco tiempo, casi todos los marsupiales autóctonos fueron sustituidos por los carnívoros migratorios como los felinos del linaje del ocelote, que siguieron diversificándose en su nuevo entorno, dando lugar a siete especies que todavía sobreviven en Sudamérica.

Cuando finalizó la última glaciación, hace unos 12.000 años, las

DISTRIBUCION ACTUAL DE LOS FELINOS



NORBERT ROSING *National Geographic Image Collection* (*gato montés europeo*); TOM BRAKEFIELD *Corbis* (*leopardo de las nieves*); JOE MCDONALD (*Lince del Canadá*); BEVERLY JOUBERT *National Geographic Image Collection* (*león africano*); TKOFOTO.COM (*gato pescador*); SA TEAM *Foto Natura/Minden Pictures* (*jaguar*)

NOTAS BREVES

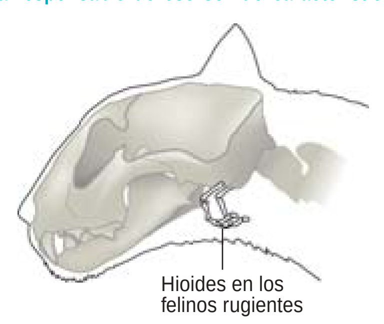
Existen unos 600 millones de gatos domésticos en todo el mundo.

Los fósiles de los felinos guardan un parecido tal, que resulta casi imposible, incluso para un experto, distinguir el cráneo de un león del cráneo de un tigre.





Los leones, los tigres, los jaguares y los leopardos son los únicos felinos que rugen. La osificación incompleta del hioides, un hueso del cuello que sostiene la lengua, es la responsable de ese sonido característico.



gruesas placas de hielo que cubrían todo Canadá y el tercio septentrional de los EE.UU. se derritieron de forma gradual; los paisajes estériles se transformaron en las tierras forestales y praderas de Norteamérica. Después del gran deshielo, un cataclismo eliminó de forma brusca 40 especies de mamíferos de Norteamérica. Las extinciones del Pleistoceno, como así se conocen, suprimieron el 75 por ciento de los animales de gran tamaño que habitaban ese territorio. Mamuts, mastodontes, lobos gigantes, grandes osos de hocico corto (*Arctodus*), perezosos gigantes terrestres, leones americanos, felinos de dientes de sable, pumas y guepardos, todos ellos habrían desaparecido de Norteamérica. Los guepardos escaparon de la extinción porque varios millones de años antes, cuando el nivel del mar era todavía bajo, algunos de sus antepasados habían regresado a Asia y, más tarde, a Africa. Los pumas evitaron la aniquilación en un refugio sudamericano; resurgieron en Norteamérica muchas generaciones después. El resto de las especies nunca reaparecieron.

Nuevas migraciones

Por el tiempo en que los guepardos regresaban desde América a Asia a través del estrecho de Bering, los precursores de los linajes del gato leopardo ❼ y del gato doméstico ❽ divergieron de sus ancestros americanos y cruzaron el puente terrestre de Bering hacia Asia. El linaje del gato leopardo se desarrollaría luego, para dar lugar al gato leopardo asiático y a cuatro especies de tamaño reducido que medran hoy en la India (gato rojo manchado), Mongolia (gato de Pallas), Indonesia (gato de cabeza plana) y otros lugares de Asia dispersos (gato pescador).

A lo largo de ese mismo período, en Asia, los grandes felinos rugientes del linaje Panthera acometieron una nueva expansión, de mayor alcance que las anteriores. Los tigres enormes de 320 kilogramos se dispersaron por el sudeste (India, Indochina, la plataforma continental Sunda y China); los leopardos de las nieves se adaptaron a las alturas del Himalaya y las montañas de Altai, en el norte y oeste de Asia central. Los leopardos no sólo se propagaron por Asia, sino que se introdujeron también en Africa, donde todavía viven. Los leones y los jaguares se desplazaron a Norteamérica durante el Plioceno tardío, hace entre tres y cuatro millones de años. Aunque las extinciones del Pleistoceno eliminaron de Norteamérica a esas dos especies, los jaguares consiguieron escapar a Sudamérica y los leones se dispersaron hacia Africa, donde encontraron un continente más hospitalario de lo que habían sido Europa, Asia o América. La supervivencia del rey de la selva en Africa está amenazada, con menos de 30.000 ejemplares. En Asia, sólo sobrevive una población minúscula y residual de unos 200 leones asiáticos endogámicos, en la reserva del bosque de Gir, provincia de Gujarat en la India occidental.

Nuestros análisis genéticos han puesto de manifiesto el riesgo de extinción que corren los tigres. Hace unos 73.000 años, las poderosas erupciones volcánicas del Toba en Borneo aniquilaron decenas de especies de mamíferos del este asiático, incluida una abundante población de tigres. Sobrevivió un reducto, que repobló toda la región en forma de una nueva raza, pero la carencia de diversidad genética en sus descendientes contemporáneos indica que los supervivientes atravesaban un cuello de botella poblacional en el momento del activismo volcánico. Lo mismo que los guepardos y los pumas de Norteamérica, el tigre escapó de la extinción por muy poco.

Felinos domésticos

La fase final de la evolución de los felinos, desde la selva hasta nuestros hogares, comenzó en los densos bosques y desiertos inmensos que rodeaban la cuenca mediterránea. En esa región fue emergiendo de forma gradual un puñado de especies de felinos diminutos (con un peso inferior a los 10 kilogramos): el gato de los pantanos del este asiático, el gato de las arenas de Oriente Medio, el gato de pies negros africano y una especie ubicua de gato salvaje con cuatro subespecies reconocidas (europea, centroasiática, del Oriente Próximo y China). A partir de una de esas subespecies salvajes comenzó uno de los experimentos más felices de la historia: la domesticación del gato. Un estudio de genética molecular de amplio alcance sobre los gatos domésticos y los gatos salvajes del mundo realizado por Carlos Driscoll, de la Universidad de Oxford, ha arrojado luz sobre ese proceso. Todos los gatos domésticos presentan rasgos genéticos que coinciden con los de los gatos salvajes asiáticos de Israel y de Oriente Próximo.

En nuestra opinión, el gato fue domesticado en varias ocasiones, todas en la región del Creciente fértil hace entre 8000 y 10.000 años, cuando las poblaciones humanas nómadas empezaron a reunirse en aldeas pequeñas alrededor de los primeros asentamientos agrícolas. Allí se cultivaba trigo, cebada y arroz. Los gatos salvajes de la región, quizás atraídos por los

SKULLS UNLIMITED; MELISSA THOMAS (*hioides*)

EL ROMPECABEZAS DE LOS FELIDOS

Los taxónomos siempre habían considerado difícil la clasificación de la familia de los félidos porque el registro fósil es escaso y resulta arduo distinguir una especie fósil de otra. Mediante el análisis del ADN de las 37 especies actuales, los autores clasificaron la familia de los felinos en ocho linajes. Obtuvieron ADN de la sangre o muestras de tejido de cada una de las 37 especies. La recopilación de todas las muestras no fue una tarea fácil, porque algunas de las especies son raras y viven en lugares remotos. Analizaron también siete especies ajenas al grupo, parientes cercanos de los felinos, pertenecientes a la familia de las civetas y mangostas (vivérridos). Se obtuvo así un valor de referencia para la estimación de las fechas de divergencia en la familia de los félidos.

Analizaron el ADN de los cromosomas X e Y, y de las mitocondrias (orgánulos celulares responsables de la producción de energía, que se transmiten a través de la línea materna). Se centraron en la secuencia de 30 genes (en total, 22.789 letras de nucleótidos para cada especie de felino). La mitad de esas secuencias diferían de una especie a otra. Diferencias que nos permitieron determinar el parentesco entre grupos y la antigüedad de los mismos. Con el tiempo, los genes van acumulando mutaciones; si no son perjudiciales, persisten. Por tanto, cuanto antes aparece una especie, más tiempo tiene para que su genoma experimente cambios, de modo que manifiesta una mayor diversidad respecto a un gen determinado. De ahí que podamos afirmar con seguridad que las especies cuyos genes comparten un gran número de cambios guardan un parentesco más estrecho.



CINNAMON:
Se ha secuenciado su ADN

Una vez se resolvieron los puntos de ramificación, o “bifurcaciones”, merced a los análisis del ADN, la atención volvió a centrarse en el registro fósil, que revelaría la cronología de las ramificaciones. Los paleontólogos han determinado la edad de docenas de fósiles de felinos antiguos mediante técnicas de datación con radiocarbono. Ciertos especímenes fósiles considerados eslabones perdidos (por ejemplo, el antepasado común más reciente del grupo de los grandes felinos, linces u ocelotes) aportaron 16 fechas de bifurcación. A continuación, mediante algoritmos matemáticos basados en un reloj molecular de acumulación constante, se tradujeron los datos genómicos en estimaciones de tiempo transcurrido desde cada nodo de divergencia. (El método del reloj molecular supone que algunos cambios evolutivos se producen a velocidad constante. Las mutaciones, por ejemplo, pueden incorporarse en el ADN de los genes a una velocidad uniforme a lo largo de millones de años. Las diferencias en el ADN, por tanto, operan como un “reloj” que permite determinar la fecha en la que dos linajes se separaron de un antepasado común.)

La aportación más reciente a las secuencias genómicas proviene de un gato abisinio llamado Cinnamon. La secuencia completa del genoma de Cinnamon, junto con la secuencia de otras 32 especies de mamíferos (incluidos hombre, ratón, perro, vaca, elefante y representantes de la mayoría de los órdenes de mamíferos), ofrece una información genética casi ilimitada correspondiente a 100 millones de años de historia de los mamíferos contemporáneos.

abundantes roedores que medraban en los graneros, se ofrecerían como compañeros guardianes del hombre; la eliminación de los molestos roedores les proporcionaba el sustento. Los gatos salvajes, cada vez más dóciles, proliferaron y unieron su destino al del ser humano.

Esos animales emprendieron a la larga una nueva migración, que empezó a pie, continuó en carros y, por último, en buques oceánicos. Los gatos domesticados, compañeros de viaje, se extendieron por todo el globo. Hoy en día habitan en el mundo unos 600 millones de gatos domésticos. Es casi la única especie de felino que no se considera amenazada, según las organizaciones conservacionistas internacionales. Hacia el siglo XIX, los dueños de los gatos apareaban de forma selectiva a sus ejemplares para obtener razas de adorno. En la lista de la Asociación Felina Americana se incluyen 41 razas oficiales de gatos, desde el Maine coon, el siamés, y el persa hasta el Korat, todos ellos con sus raíces en la cuna de la civilización humana y felina, en el Creciente fértil.

La historia evolutiva que se deduce de nuestros estudios sobre la familia de los felinos sirve como precursora en el nuevo campo de la “prehistoria genómica”. En cuanto a los felinos, las pautas de diferenciación genómica en cada especie contienen la impronta sobre su parentesco, migraciones, cuellos de botella y expansiones a través del planeta.

KRISTINA NARFSTRÖM

Los autores

Stephen J. O’Brien se doctoró en genética por la Universidad de Cornell. Realizó su posdoctorado en el Instituto Nacional del Cáncer de los EE.UU., en donde fundó y dirige el Laboratorio de Diversidad Genómica. **Warren Johnson** se doctoró en ecología animal en la Universidad estatal de Iowa. Ingresó luego en el Laboratorio de Diversidad Genómica.

Bibliografía complementaria

PHYLOGEOGRAPHY AND CONSERVATION GENETICS OF TIGERS (*PANTHERA TIGRIS*). S.-J. Luo *et al.* en *PLoS Biology*, vol. 2, págs. 2277-2293; 2004.

BIG CAT GENOMICS. S. J. O’Brien y W. Johnson en *Annual Reviews of Genomic and Human Genetics*, vol. 6, págs. 407-429; 2005.

THE LATE MIOCENE RADIATION OF MODERN FELIDAE: A GENETIC ASSESSMENT. W. E. Johnson, E. Eizirik, J. Pecon-Slattery, W. J. Murphy, A. Antunes, E. Teeling y S. J. O’Brien en *Science*, vol. 311, págs. 73–77; 2006.

BANDA ANCHA OPTICA EN HABITACIONES

Transmisiones de luz codificada proporcionarían servicios multimedia de la Red a los equipos inalámbricos que se encuentren en una sala

Mohsen Kavehrad

Conceptos básicos

- La distribución inalámbrica de servicios multimedia de Internet a múltiples usuarios en interiores puede efectuarse mejor mediante haces luminosos que mediante ondas de radio.
- Las redes ópticas inalámbricas de área local se valen de rayos de luz visible o invisible codificada para transmitir datos en banda ancha a usuarios fijos y móviles dentro de sus viviendas y oficinas.
- La luz ofrece una banda de mayor anchura que las ondas de radio de Wi-Fi, WiMAX y otras redes similares; esa ventaja permite la utilización simultánea por muchos usuarios. Con ello, ni se producen interferencias, ni la señal atraviesa las paredes; no cabe, pues, las escuchas furtivas.

Los ingenieros electrónicos sueñan desde hace mucho con la conectividad ubicua: la distribución inalámbrica de datos de la índole que sea para todos, en cualquier lugar y momento. Y son notables los logros alcanzados: más de dos mil millones de personas poseen teléfonos celulares, cientos de millones intercambian mensajes y ficheros por medio de ordenadores portátiles, móviles y otros dispositivos digitales que utilizan Wi-Fi, la técnica de radiofrecuencia de las redes inalámbricas de área local.

Por añadidura, cada vez más usuarios de Wi-Fi disfrutan de la comodidad de usar aparatos inalámbricos móviles en cualquier lugar interior. Al mismo tiempo, los dispositivos y aparatos electrónicos tradicionalmente fijos se enriquecen con medios de transmisión inalámbricos que permiten comunicarse con ellos desde la distancia. Crece el deseo de acceder a servicios de banda ancha sin necesidad de utilizar los enlaces por hilo físico acostumbrados. Pero la limitación del ancho de banda disponible en las gamas de frecuencia deseadas determina que la velocidad de transmisión y la capacidad de canal en Wi-Fi sean insuficientes y, por tanto, que sea lento el acceso a los servicios multimedia de la Red, tales como la navegación y la videoconferencia por Internet, o la televisión y el cine a petición.

Ni siquiera los nuevos radiosistemas de área extensa y alta velocidad, como el WiMAX, se prestan mucho a las estructuras de comunicaciones inalámbricas interiores en banda ancha, ya que dentro de un espacio limitado sólo pueden atender a unos pocos usuarios. Lo que es peor, no ofrecen unas comunicaciones seguras.

Una opción alternativa interesante es la transmisión óptica inalámbrica. En vez de ondas radioeléctricas, las redes ópticas inalámbricas de área local envían datos en haces codificados de luz blanca o infrarroja (de esta última es la señal invisible empleada en los mandos a distancia). Los sistemas ópticos conectarían los dispositivos digitales inalámbricos a un puerto de datos sito en una habitación; el puerto, a su vez, podría conectarse a cualquier red de datos en banda ancha que atienda a la casa o edificio. Esta técnica, en rápido desarrollo, ofrece varias ventajas: sus células —zonas de servicio básicas— enfocadas y libres de interferencias conceden una banda de anchura casi ilimitada a múltiples usuarios; proporciona una seguridad casi total puesto que, a diferencia de las ondas de radio, la luz no atraviesa las paredes; y el inalámbrico óptico resulta muy adecuado para amplios espacios en empresas, compartidos por numerosos usuarios de gran ancho de banda, muy próximos entre sí, como en el caso de una nave de fábrica o de una oficina dividida en muchos habitáculos reconfigurables.

Datos en la luz

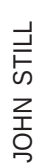
Quizás hayan oído hablar del problema del "último kilómetro", es decir, el coste elevado de distribuir servicios de banda ancha desde una red nacional de datos a alta velocidad hasta los usuarios fijos. Por el contrario, para la técnica de transmisión óptica el problema es "el último metro": el tráfico en banda ancha se ha de enviar desde la cabecera de la red de información cableada a los dispositivos inalámbricos del interior.

Las comunicaciones ópticas en interiores se investigan desde los primeros años ochenta, cuando IBM construyó en Zúrich el primer sistema útil. Durante un decenio languidecieron porque Internet todavía estaba en pañales y no se había creado demanda de transmisión inalámbrica en banda ancha. En los últimos años, sin embargo, el asombroso crecimiento de la Red lo ha cambiado todo.

Se considera sistemas "ópticos" a las redes de área local inalámbricas de diodos fotoemisores (LED) de luz blanca y luz infrarroja porque transmiten datos por medio de ondas lumínicas (o fotones) visibles e invisibles, en vez de recurrir a ondas de radio o microondas, de mayor longitud de onda. Los sistemas ópticos inalámbricos de hoy emplean radiaciones infrarrojas de muy débil intensidad —el segmento "óptico" del espectro electromagnético, con longitudes de onda mayores que las de la luz visible, pero menores que las de las ondas radioeléctricas—, radiaciones a las que somos insensibles. (Cuando la luz infrarroja se emite a intensidades más altas, la percibimos en forma de calor.)

Los enlaces ópticos funcionan mejor cuando el transmisor apunta directamente al receptor, como en los sistemas de "apuntar y disparar" de los mandos a distancia de la televisión y de las cámaras digitales. Mas para la interconexión de una oficina entera o el acceso a la red desde lugares públicos, como aeropuertos o restaurantes, no resulta factible. Para lograr plena cobertura en una sala, las redes ópticas dispersan a través del espacio haces que contienen datos (*véase el recuadro* "Red óptica inalámbrica"). Los haces de infrarrojos codificados rebotan en todas las superficies: paredes, mesas, máquinas de café, hasta en los rostros

LAS ONDAS LUMINOSAS pueden transmitir datos en banda ancha a velocidad elevada hacia y desde dispositivos digitales móviles en interiores, sin que importen los desplazamientos del usuario.



HACIA 2010,
MAS DE 20 MILLONES
DE USUARIOS DE BANDA ANCHA INALAMBRICA
accederán a servicios de datos en alta velocidad a través de WiMAX y otras redes de área extensa por radio, según las predicciones de mercado de Visant Strategies. Los usuarios de espacios interiores podrían ser atendidos mejor por sistemas ópticos inalámbricos.

EL PASO SIGUIENTE

RADIO FRENTE A INFRARROJOS

En los sistemas de infrarrojos no dirigidos (difusos), los haces de luz codificada se dispersan por reflexión en las paredes de la habitación. Comparados con los de radiofrecuencia, ofrecen una serie de ventajas para la distribución inalámbrica de datos en banda ancha en espacios interiores.

VELOCIDAD DE TRANSMISION

Radio: La precaución de mantener la potencia en niveles seguros que no perjudiquen a los usuarios interiores limita la velocidad de transferencia de datos a varios cientos de megabit por segundo.

Infrarrojos: Velocidades de transferencia de datos de gigabit por segundo.

LIMITACION DE ANCHO DE BANDA

Radio: Como las señales enviadas a la misma frecuencia se interfieren entre sí, la Comisión Federal de Comunicaciones regula las bandas de transmisión y eso restringe el ancho de banda disponible.

Infrarrojos: Los fotones no se interfieren unos a otros. El ancho de banda utilizable está limitado por la velocidad máxima a la que los fotodiodos del receptor pueden registrar los datos entrantes y prepararse para recibir más.

Mando a distancia por infrarrojos para TV

SEGURIDAD

Radio: Las ondas de radio atraviesan paredes y están expuestas a la escucha furtiva.

Infrarrojos: La luz no traspasa los muros, con lo que se evitan intromisiones.

DESVANECIMIENTO POR MULTITRAYECTO

Radio: Tras reflejarse en las superficies conductoras, las ondas de radio codificadas llegan a menudo en instantes diferentes. A veces su desfase es suficiente para que las crestas coincidan con los valles y se anulen entre sí.

Infrarrojos: Con las ondas de luz, la interferencia destructiva es imposible. Los sensores del área activa de un fotodiodo absorben las ondas por separado y después promedian la energía entrante, de modo que no pueden producirse cancelaciones.

Enrutador Wi-Fi

FUENTE DE RUIDOS PRINCIPAL

Radio: La interferencia cocanal, la debida a otros usuarios que transmiten en la misma frecuencia, limita la velocidad de transmisión.

Infrarrojos: Las señales espurias que provienen de luces ambientales —rayos solares, lámparas, etcétera— limitan la velocidad de transmisión.

de quienes se encuentren allí. Las reflexiones resultantes se esparcen por todo el interior, de modo que los receptores pueden orientarse en cualquier dirección. Aunque este método ya lo aplican algunos productos comercializados de redes infrarrojas, los rebotes crean efectos similares a ecos, que complican la verificación técnica de la seguridad de los datos captados por el receptor de señal. Los ecos pueden ocasionar pérdidas de datos y limitar apreciablemente la velocidad de transmisión en la red.

Poner el infrarrojo a trabajar

Para encarar el problema del eco, nuestro grupo de la Universidad estatal de Pennsylvania desarrolló un sistema óptico inalámbrico que envía múltiples copias de los datos bajo la forma de una retícula de haces estrechos de infrarrojos que llenan el volumen de un espacio interior (*véase el recuadro* “Los filtros holográficos suprimen los ecos”). Estos haces de baja potencia, con idénticas señales en cada uno de ellos, conectan el puerto de acceso, unido por cable físico a la infraestructura de datos de alta velocidad, con todos los dispositivos digitales de la habitación equipados con receptores de infrarrojos. La repetición del haz codificado permite a los usuarios desplazarse por la sala sin dejar de estar conectados al sistema, pues al perder conexión con ciertos haces la establecen con otros. Un dispositivo que al mismo tiempo recibe varios trenes de datos idénticos puede realizar una corrección de errores, sin más que comparar los datos que le llegan por distintos haces y cerciorarse de su exactitud. La retícula de haces estrechos permite transmitir con rapidez y muy pocos errores las señales; a un gigabit por segundo, cientos de veces más deprisa que un módem DSL. Con un sistema de este género, el acceso inalámbrico de banda ancha en interiores sería coser y cantar.

Para crear la retícula luminosa emitimos la señal infrarroja codificada a través de un filtro holográfico especial, llamado conformador de haz, que dispersa los haces en las direcciones deseadas. Para construirlo, se ilumina primero una lámina de plástico fotosensible de bajo coste con una imagen de una retícula tomada desde dos direcciones; a tal fin, el haz con la imagen se divide en dos partes mediante un espejo semiplateado, que se recombinan luego con un par de directores de haz. Se consigue así iluminar la lámina fotosensible con la misma imagen de retícula desde diferentes ángulos, creando una imagen tridimensional o volumétrica. Cuando el transmisor inalámbrico de infrarrojo envía un haz de luz codificada a través del filtro holográfico, las numerosas copias que emergen en la salida forman un patrón reticular tridimensional.

El patrón de haz que utilizaremos dependerá de la configuración de la sala; pueden iluminarse diferentes áreas según se necesite: en abanico, en reja rectangular, en círculos concéntricos, etcétera. A este respecto, los espacios de uso general, como oficinas y fábricas, suelen tener iluminación uniforme, mientras que en ciertas exposiciones la luz se enfoca en los objetos exhibidos. Del mismo modo, las instalaciones ópticas inalámbricas pueden optimizarse de suerte que los haces se concentren en las zonas donde trabajen muchos usuarios de banda ancha y no en los espacios donde trabaje menos gente.

Un receptor inalámbrico de infrarrojos en interiores está equipado con un filtro holográfico similar, de “ojo de mosca”, que recoge los haces de “respuesta” o retorno emitidos por los

GETTY IMAGES (*mando a distancia*); D-LINK CORPORATION (*enrutador*)

dispositivos digitales. El filtro encauza las señales recibidas de múltiples direcciones hacia fotodetectores independientes; mejora la recepción al combinar las energías de los haces.

Fotoemisores inalámbricos de luz blanca

Estos sistemas inalámbricos de luz infrarroja serán reemplazados, muy probablemente, por redes de área local basadas en fotoemisores blancos (LED). Ofrecen anchuras de banda todavía mayores, aparte de otras ventajas. La fotoemisión por diodos se va considerando una opción alternativa al alumbrado ordinario, al tiempo que podría ofrecer como función complementaria la transmisión en banda ancha.

Los LED de luz blanca combinan el bajo consumo de energía y la larga vida de los tubos fluorescentes con el agradable espectro luminoso de las bombillas de incandescencia. Según los expertos del sector, estos chips de silicio generadores de luz blanca se producirán en serie de aquí en unos años. En su fabricación se utilizarán las técnicas tradicionales de los circuitos integrados, a un coste aún más ventajoso que el de los fluorescentes compactos, la alternativa de bajo consumo preferida actualmente. Lo que todavía no se aprecia generalmente, sin embargo, es que la misma técnica de fotoemisión en blanco que un día permitirá alumbrar estancias y demás espacios interiores a muy poco coste y con gran rendimiento, ofrecerá al mismo tiempo acceso inalámbrico en banda ancha a todos los aparatos digitales, bien equipados, que haya dentro de esos recintos. Cuando se encienda una lámpara LED blanca, un dispositivo inalámbrico podrá recibir transmisiones en banda ancha a través de la luz que emita el LED.

A diferencia de otras fuentes de luz ya existentes, podemos adaptar sin problemas un LED para que funcione como transmisor de comunicaciones inalámbricas en luz visible. Un equipo de investigadores de la Universidad Keio, en Japón, presentó la idea hace unos años. La rapidez de conmutación de tales diodos —una especie de semáforos avanzados que operan en la gama de los megahertz— les permite codificar las comunicaciones inalámbricas mediante modulaciones de la luz visible. Según los primeros resultados experimentales obtenidos por nuestro grupo investigador, un diodo fotoemisor blanco existente en el mercado es susceptible de modularse para emitir señales hasta a una frecuencia de 100 megahertz, velocidad de todo punto inapreciable para el ojo humano.

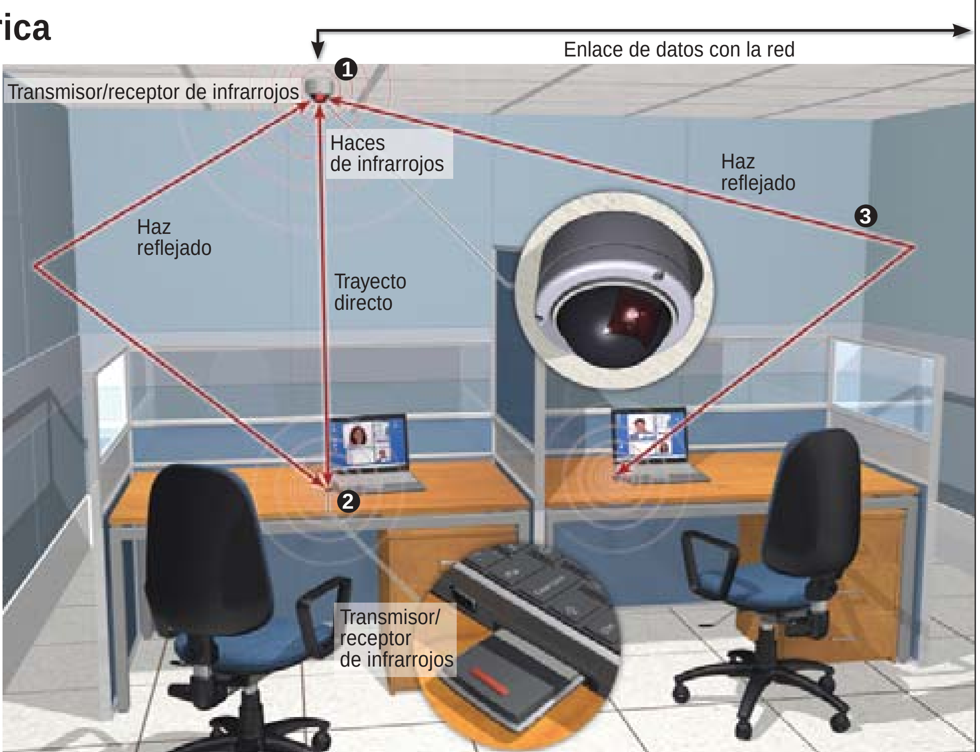
Los LED blancos ofrecen una serie de ventajas en las comunicaciones inalámbricas interiores a través de Wi-Fi e, incluso, de redes de infrarrojos. Como estos LED terminarán por aportar alumbrado interior, será más fácil instalar un sistema inalámbrico que se base en ellos que no la mayoría de los demás sistemas. Además, la presencia de objetos de uso cotidiano en las estancias bloquea las transmisiones punto a punto y produce una degradación —un "ensombrecimiento"— de las señales, que sería mínima con los aparatos con LED de luz blanca, ya que por lo común se hallarían repartidos por toda la habitación. Serían especialmente útiles las instalaciones en el techo, pues habría menos riesgo de obstrucción de los haces. Como en todos los sistemas ópticos, la fotoemisión en luz blanca no es susceptible de interferencia por señales luminosas de otros colores y ofrece una enorme anchura de banda para comunicaciones.

Interesa señalar que los ocupantes de una estancia podrán apagar las

MODO DE FUNCIONAMIENTO

Red óptica inalámbrica

En contraste con las técnicas radioeléctricas, como Wi-Fi o los nuevos sistemas WiMAX, las redes ópticas permiten conectar a Internet múltiples dispositivos portátiles interiores, por luz infrarroja y a velocidades propias de la banda ancha. Unos transmisores/receptores de infrarrojos, nada costosos, dirigen las señales dentro de una sala ❶ para conectarse con aparatos equipados con tarjetas enchufables que puedan transmitir y recibir la luz infrarroja codificada ❷. Como las señales de luz no se interfieren entre sí (a diferencia de las señales de radio) y ofrecen una banda más ancha, muchos más dispositivos pueden compartir la red óptica. Las barreras —unos paneles de separación, por ejemplo— no impiden la recepción, puesto que los haces se reflejan en los tabiques de la sala ❸. Se trabaja ahora en sistemas similares que utilizan lámparas de LED blancos, cuya frecuencia de destello codificado supera la que puede percibir el ojo humano.



5W INFOGRAPHICS

luces por la noche y seguir utilizando ordenadores portátiles y otros aparatos; aun cuando los LED se encontraran “inactivos” y oscuros, una alimentación de baja intensidad les permitiría emitir fotones residuales en cuantía suficiente para la comunicación inalámbrica. Otra solución sería diseñar sistemas de LED blancos que incluyeran fuentes luminosas de bajo coste que emitiesen frecuencias invisibles y se encargasen de transmitir la información cuando se apagara el alumbrado blanco.

Quedan todavía por resolver varias cuestiones relativas a la técnica de redes inalámbricas de área local con LED blancos. Una fase esencial será el diseño de sistemas de señalización de retorno, o ascendente, mediante los cuales los aparatos inalámbricos se comunicarían con dichos LED y, por tanto, con la infraestructura troncal. Podrían, por ejemplo, equiparse los aparatos con emisores (o tarjetas enchufables si ha de adaptarse el aparato) que produzcan una longitud de onda diferente, invisible (quizás infrarroja). Esas fuentes de luz enviarían haces codificados a unas lámparas LED blancas provistas de pequeños fotodiodos receptores. O bien el sistema podría funcionar en una sola longitud de onda visible y aprovechar que los LED tienen frecuencias de pulsación muy altas (están “ocultados”, o la mayor parte del tiempo activos con períodos inactivos muy breves). Las señales de retorno de los dispositivos inalámbricos podrían transmitirse a los receptores durante los ciclos de inactividad predeterminados de los LED. Esta técnica se denomina “dúplex por división en el tiempo”. Sea cual sea la solución final, el equipo añadido elevará algo el coste del sistema.

Quienes desarrollen sistemas de LED blancos tendrán asimismo en cuenta los posibles efectos negativos —aún no investigados— de la luz natural y artificial que entra por las ventanas o viene de otras fuentes. Y antes de plasmar diseños practicables, los ingenieros deberán efectuar simulaciones y ensayos adicionales para determinar el equilibrio óptimo entre la iluminación interior y las comunicaciones. Por último, los investigadores habrán de crear técnicas eficaces de codificación, decodificación, modulación y combinación de diversidades en el espectro visual, que a la vez sean compatibles con la función de iluminar y con la función de comunicar.

Banda ancha por línea eléctrica

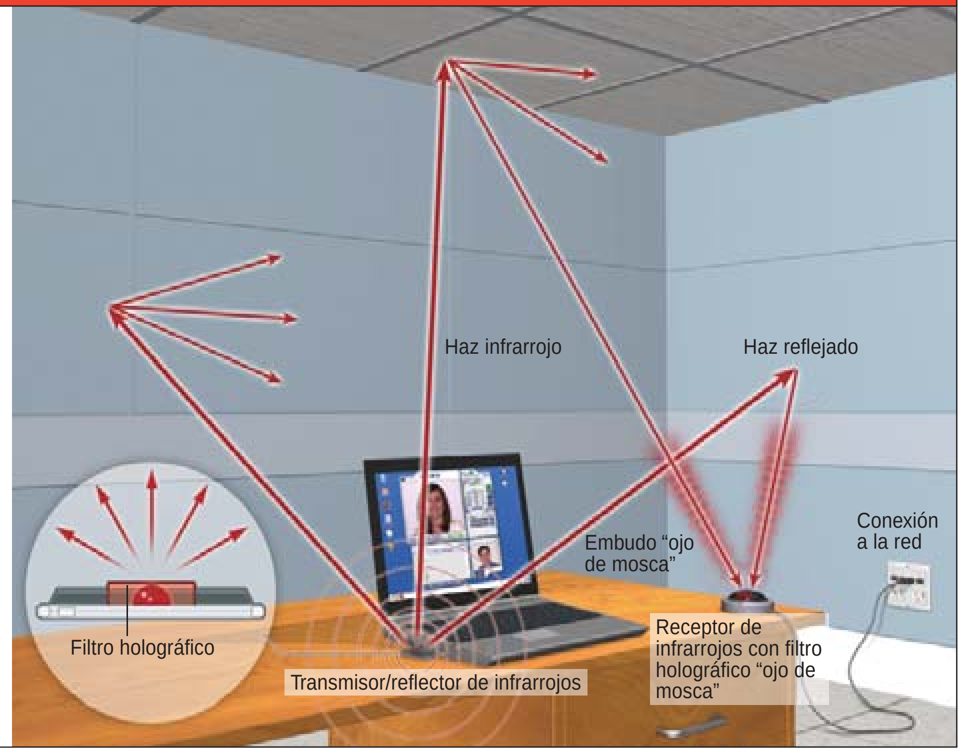
Tanto una variante como la otra (la infrarroja y la visible) de la transmisión inalámbrica óptica mejorarían grandemente con un prometedor sistema de acceso a la banda ancha en el último trecho, el “último kilómetro”, para usuarios fijos: la transmisión por línea eléctrica a alta velocidad de datos, sobre redes eléctricas de mediana o baja tensión, hasta las tomas de corriente en las paredes de la casa (*véase el recuadro* “Banda ancha por el enchufe de la pared”). El sistema BoPL —por sus siglas en inglés *Broadband over Power Line*, “banda ancha por la línea eléctrica”— aprovecha la red eléctrica actual para transportar información de banda ancha por los mismos cables que llevan electricidad a los usuarios [*véase* “Informatización del hogar”, por W. Wayt Gibbs; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 2002].

En EE.UU. ya ofrecen esos servicios compañías de Ohio, Texas y otros estados, con tarifas comparables a las del DSL. Y son muchos los usuarios que reciben servicios de Internet a través de la red eléctrica en Europa y Asia (por ejemplo, en España, Suecia, Noruega, Países Bajos, Corea del Sur y Japón), donde la ar-

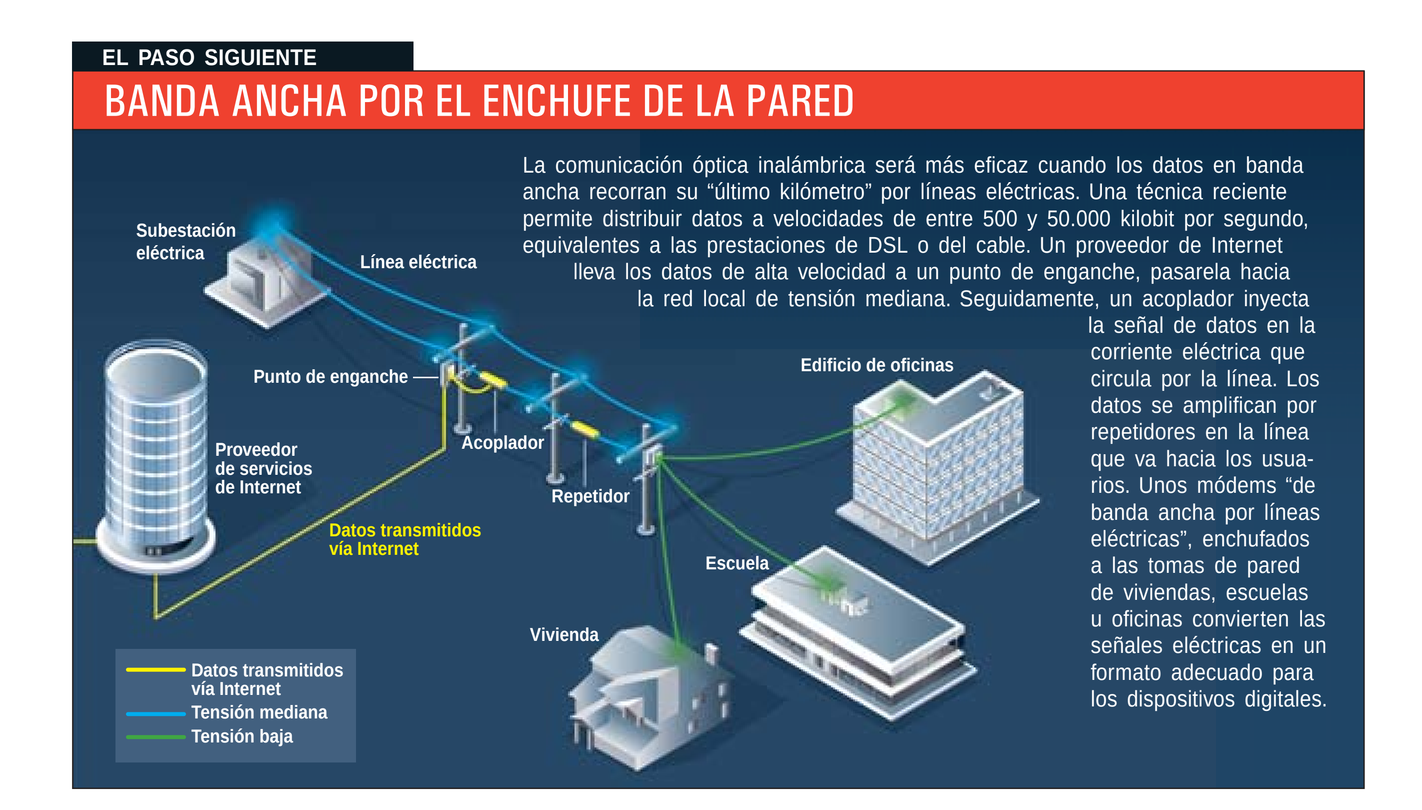
INNOVACION DEL AUTOR

LOS FILTROS HOLOGRAFICOS SUPRIMEN LOS ECOS

En los actuales sistemas ópticos inalámbricos, los haces de infrarrojos rebotan en las superficies de la habitación y esparcen reflejos por el interior. Como los haces dispersados recorren trayectos de distinta longitud, su llegada al receptor se produce con ligeras diferencias de tiempo y crea un efecto similar al eco. Los haces codificados se solapan, pues, de un modo aleatorio, lo que dificulta el exacto reconocimiento por la red de los datos recibidos. Por tanto, se pierde información y la velocidad disminuye. Una solución consiste en colocar sobre el transmisor un filtro holográfico especial; este filtro multiplica cada haz codificado en copias idénticas según un patrón reticular de amplio alcance que llena toda la estancia. Un filtro holográfico similar, “en ojo de mosca”, instalado sobre el receptor (*a la derecha, abajo*), encauza las señales procedentes de diversos sectores hacia sensores independientes en la zona activa del fotodiodo. Así será fácil comprobar la igualdad de los datos transportados por diferentes trayectos.



5W INFOGRAPHICS



quitectura de la red eléctrica existente facilita su adaptación a ese propósito. La aplicación de este "puente" de banda ancha a la transmisión óptica inalámbrica se efectuaría enchufando en las tomas de corriente murales unos pequeños adaptadores, económicos, que incorporan transmisores de infrarrojos. A través de ellos se podrían enviar datos a cualquier dispositivo digital de la habitación que estuviese equipado con un receptor óptico. En los edificios iluminados por LED de luz blanca no harán falta adaptadores.

Nuestro grupo ha demostrado que un sistema de LED blancos para alumbrado y comunicaciones inalámbricas de alta velocidad, combinado con la técnica BoPL, permitiría transmitir datos a velocidades de hasta un gigabit por segundo, muy superiores a las del DSL conocido (unos megabit por segundo) y las del cable (una media de alrededor de 50 megabit por segundo). Esa velocidad máxima se verá solamente limitada por las diferencias de trayecto óptico dentro de una sala de determinada forma y dimensiones, capaces de crear distorsiones de la señal. Así, las recepciones múltiples de un mismo mensaje podrían causar problemas si no estuvieran procesadas de forma correcta. Sin embargo, un apropiado diseño del sistema puede mantener la distorsión en niveles aceptables, o incluso aprovechar la multiplicidad de copias para mejorar la calidad del servicio de banda ancha prestado a los usuarios finales.

Se utilice luz infrarroja o luz visible, los operadores de dispositivos digitales inalámbricos no tardarán en disponer de un nuevo camino para encauzar la banda ancha hacia el futuro. La técnica óptica inalámbrica está bien equipada para actuar como pasarela que salve este último trecho del acceso digital hasta los lugares donde vivimos y trabajamos.

5W INFOGRAPHICS

El autor

Mohsen Kavehrad es profesor de ingeniería eléctrica y director fundador del Centro de Investigación en Tecnología de la Información y Comunicaciones de la Universidad estatal de Pennsylvania. Anteriormente había trabajado para los Laboratorios Bell. Se doctoró en ingeniería eléctrica por la Universidad Politécnica de Nueva York en 1977, y es miembro del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE).

Bibliografía complementaria

SPOT-DIFFUSING AND FLY-EYE RECEIVERS FOR INDOOR INFRARED WIRELESS COMMUNICATIONS. G. Yun y M. Kavehrad en *Conference Proceedings, IEEE Wireless Communications*, junio 1992.

FUNDAMENTAL ANALYSIS FOR VISIBLE-LIGHT COMMUNICATIONS SYSTEM USING LED LIGHTS. T. Komine y M. Nakagawa en *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 50, págs. 100-107, febrero 2004.

SHORT-RANGE OPTICAL WIRELESS COMMUNICATIONS. Dominic C. O'Brien y Marcos Katz. Wireless World Research Forum (WWRF11), Oslo, junio 2004.

HYBRID MV-LV POWER LINES AND WHITE LIGHT-EMITTING DIODES FOR TRIPLE-PLAY BROADBAND ACCESS COMMUNICATIONS. M. Kavehrad y P. Amirshahi en *Achieving the Triple Play: Technologies and Business Models for Success*. International Engineering Consortium, 2005.

TRANSMISSION CHANNEL MODEL AND CAPACITY OF OVERHEAD MULTI-CONDUCTOR MEDIUM-VOLTAGE POWER-LINES FOR BROADBAND COMMUNICATIONS. P. Amirshahi y M. Kavehrad. IEEE Consumer Communications and Networking Conference, Las Vegas, enero 2005.

Cámaras ocultas en la

El descubrimiento de un túnel bajo la Pirámide del Sol de Teotihuacan facilita la búsqueda de cavidades ocultas en este monumento arqueológico mediante la detección de rayos cósmicos



Pirámide del Sol

R. Alfaro, E. Belmont Moreno, A. Cervantes, V. Grabski, J. M. López Robles, L. Manzanilla, A. Martínez Dávalos, M. Moreno, A. Sandoval y A. Menchaca Rocha



1. TEOTIHUACAN constituye la ciudad más importante y representativa del período clásico en el altiplano central mexicano. Esta vista desde lo alto de la Pirámide de la Luna muestra, en el centro, el gran eje que define la calzada de los Muertos. A la izquierda se alza la construcción de mayor tamaño: la Pirámide del Sol.

R. ALFARO, E. BELMONT MORENO, A. CERVANTES, V. GRABSKI, J. M. LOPEZ ROBLES, L. MANZANILLA, A. MARTINEZ DAVALOS, M. MORENO Y A. MENCHACA ROCHA

La búsqueda de bóvedas en sitios históricos constituye una de las tareas más interesantes del quehacer arqueológico. Pero cuando se trata de pirámides y otros monumentos de gran tamaño, esta labor se encuentra severamente limitada por la carencia de técnicas prospectivas de gran penetración. En el decenio de los setenta del siglo pasado, Luis Alvarez, entonces en la Universidad de California en Berkeley, demostró que la existencia de túneles en la base de un monumento facilita la obtención de información estructural del mismo mediante la detección de rayos cósmicos.

E. P. George, entonces en el Colegio Birkbeck de la Universidad de Londres, desarrolló en 1955 la técnica de atenuación de muones para medir el espesor de la capa de nieve que en invierno cubría las montañas australianas (instalaba los detectores de muones en verano). Años después, Alvarez y su grupo colocaron un detector de muones en una cámara situada bajo la Pirámide de Kefrén, en Giza. Lograron así eliminar especulaciones surgidas de la similitud con la vecina Pirámide de Keops, sobre la posible existencia de una bóveda superior en ese monumento.

En la ciudad mexicana de Teotihuacan, el hallazgo de un túnel excavado a ocho metros bajo la Pirámide del Sol, y que llega cerca del centro de la base, ofrece una oportunidad extraordinaria para llevar a cabo una medición similar. El objetivo de nuestro trabajo es utilizar los rayos cósmicos para arrojar luz sobre uno de los mayores enigmas de la cultura teotihuacana: el propósito por el que se construyó la Pirámide del Sol.

La Pirámide del Sol

Teotihuacan constituye la ciudad más importante y representativa del período clásico en el altiplano central mexicano. Esta gran urbe se desarrolló durante los primeros seis siglos de la Era cristiana; su rico legado cultural muestra el crecimiento e influencia que alcanzó en toda Mesoamérica y en el norte de México. En el centro de Teotihuacan destacan dos estructuras monumentales: las Pirámides del Sol y de la Luna. Teotihuacan cuenta también con un complejo ceremonial y administrativo, la Ciudadela, y con lo que se denomina el "Gran Conjunto". Todo está planeado con base al eje que define la Calzada de los Muertos, donde se alzan otras construcciones y conjuntos residenciales.

La Pirámide del Sol constituye la estructura de mayor tamaño en Teotihuacan. Desde sus 65 metros de altura se domina todo el conjunto arqueológico. Su base cuadrada con lados de 215 metros cubre una superficie total de 46.225 metros cuadrados; ocupa un volumen aproximado de un millón de metros cúbicos. La parte externa de la pirámide se subdivide en cinco cuerpos. La cara principal, accesible desde la Calzada de los Muertos, está orientada a 15º 17' respecto al norte astronómico; cuenta con unas escaleras. También en ese lado encontramos un "cuerpo adosado", desviado unos grados al



2. EL VALLE DE MEXICO se encuentra en el altiplano central, a casi 40 kilómetros al noreste de la actual ciudad de México. Comprende un área aproximada de 505 km^2; su altitud ronda los 2300 metros. La ubicación estratégica de Teotihuacan en este valle resultó decisiva para la influencia de la ciudad en Mesoamérica y en el norte de México. La región contaba con abundantes fuentes de agua, que propiciaron el asentamiento y desarrollo de culturas como la teotihuacana y mexica.

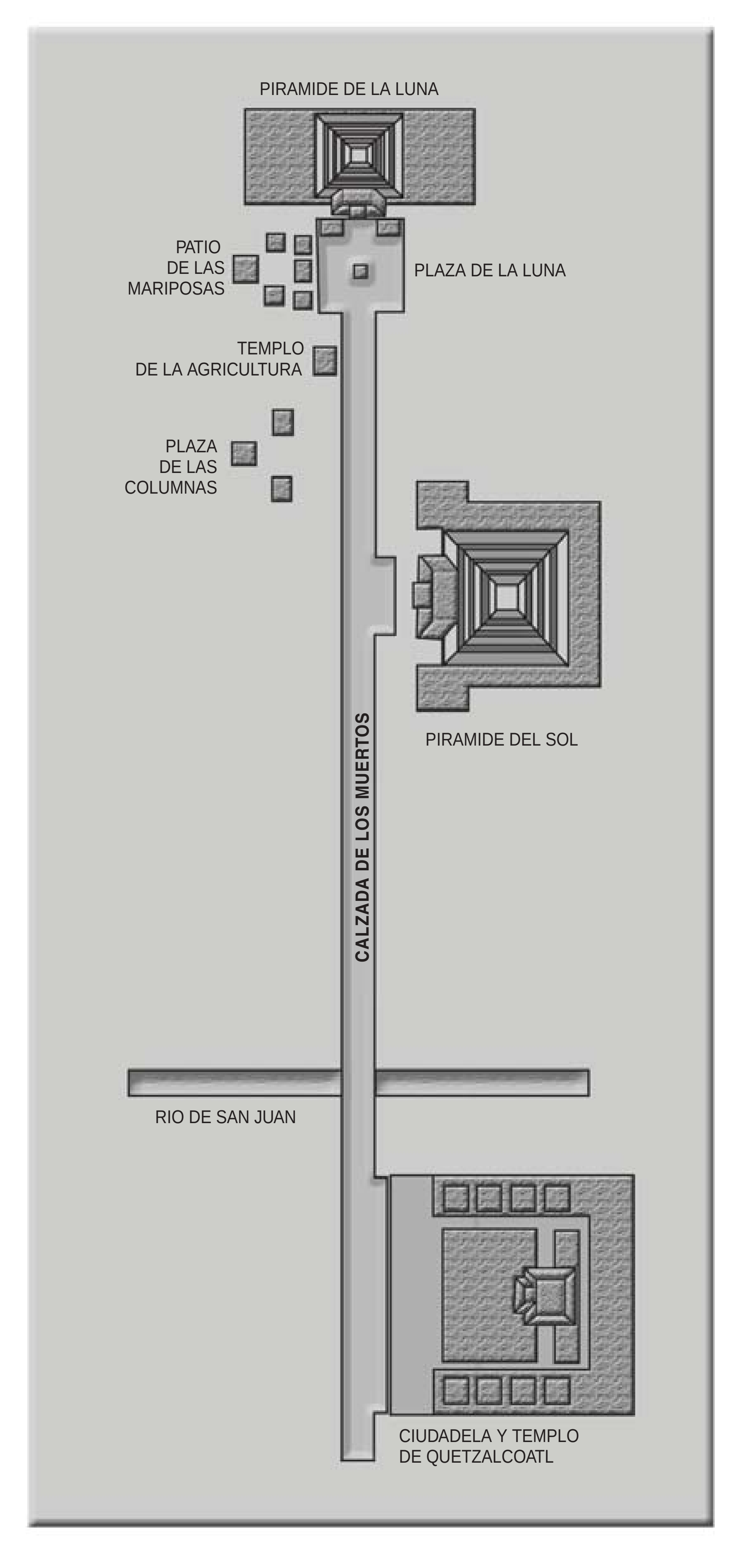
R. ALFARO, E. BELMONT MORENO, A. CERVANTES, V. GRABSKI, J. M. LOPEZ ROBLES, L. MANZANILLA, A. MARTINEZ DAVALOS, M. MORENO Y A. MENCHACA ROCHA

noroeste del eje de la pirámide; indica con mayor exactitud la dirección de la puesta del sol. Su altura es inferior a la del primer cuerpo; tiene un saliente de 17 metros de largo y 38 metros de ancho. Una gran plataforma en U rodea la pirámide por sus lados norte, este y sur. En fecha reciente se descubrieron un canal de tres metros de ancho que rodea la pirámide, así como unos marcadores astronómicos sobre el piso de estuco de la última etapa constructiva de Teotihuacan.

Estudios arqueológicos

Desde la época colonial, los cronistas dedicaron parte de su obra a Teotihuacan; sobre todo a la Pirámide del Sol. Entre ellos destacaron fray Jerónimo de Benavente (Motolinia), fray Jerónimo de Mendieta, fray Bernardino de Sahagún y fray Juan de Torquemada. También el Barón de Humboldt, quien llegó a México en 1803. En 1864, la Comisión Científica de Pachuca realizó, bajo la dirección de Ramón Almaraz, el primer estudio formal de Teotihuacan. El informe correspondiente describe la orientación de las pirámides; respecto a la Pirámide del Sol, señala la existencia de la plataforma que la rodea por tres de sus lados.

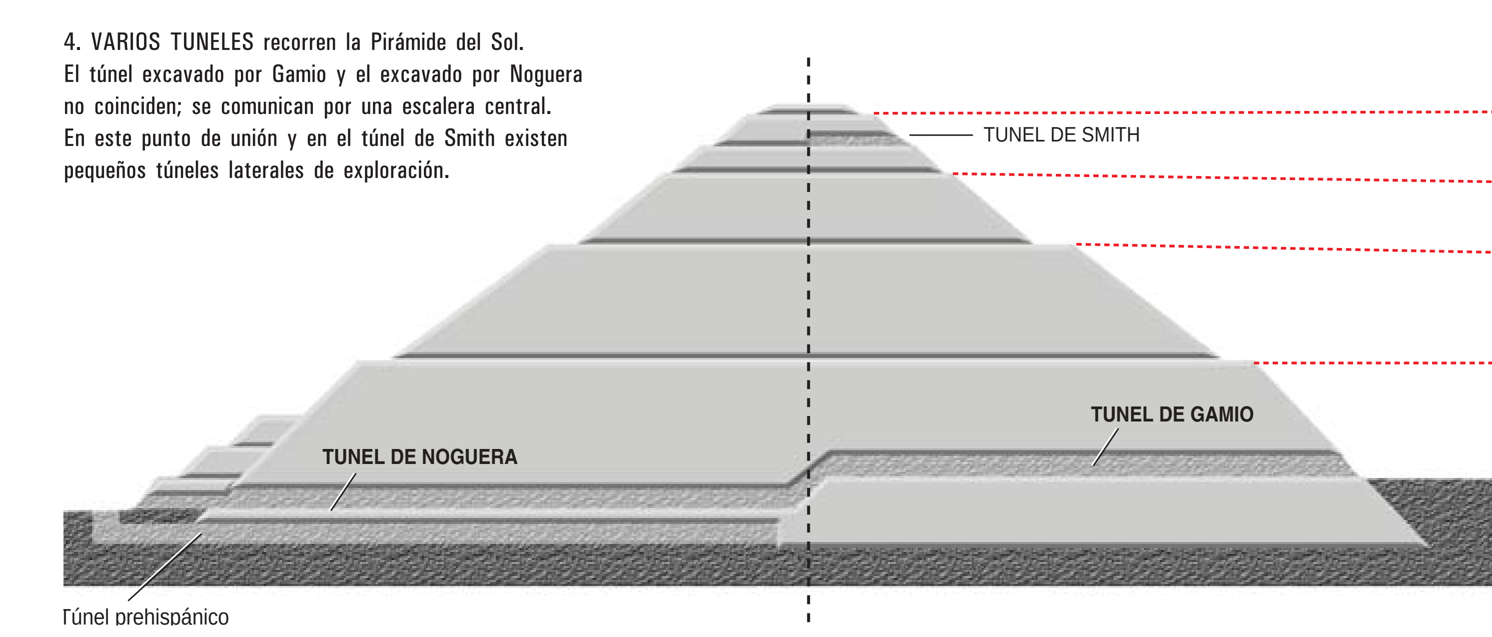
Las exploraciones oficiales en Teotihuacan no comenzaron hasta 1905, cuando Porfirio Díaz designó como Inspector de Monumentos Arqueológicos a Leopoldo Batres. Este realizó los primeros trabajos de restauración en la Pirámide del Sol ese mismo año; removió la tierra que la cubría para revelar la forma original. En 1917, Manuel Gamio fue el primer arqueólogo en llevar a cabo un proyecto multidisciplinario en Teotihuacan; por medio de la estratigrafía artificial, se proponía descifrar la cronología de la Pirámide del Sol. En 1922, el propio Gamio decidió abrir un túnel: desde el lado este de la pirámide hasta el centro. El túnel penetró 97 metros en dirección oeste desde la primera plataforma de la pirámide, que marca la división entre el primer y el segundo cuerpo, cerca del nivel del suelo. En 1933, Eduardo



3. EL CENTRO URBANO DE TEOTIHUACAN con algunas de las construcciones más importantes: la Pirámide del Sol, la de la Luna y la Ciudadela, ubicadas a lo largo de la Calzada de los Muertos, el eje principal de la ciudad.

R. ALFARO, E. BELMONT MORENO, A. CERVANTES, V. GRABSKI, J. M. LOPEZ ROBLES, L. MANZANILLA, A. MARTINEZ DAVALOS, M. MORENO Y A. MENCHACA ROCHA

4. VARIOS TUNELES recorren la Pirámide del Sol. El túnel excavado por Gamio y el excavado por Noguera no coinciden; se comunican por una escalera central. En este punto de unión y en el túnel de Smith existen pequeños túneles laterales de exploración.

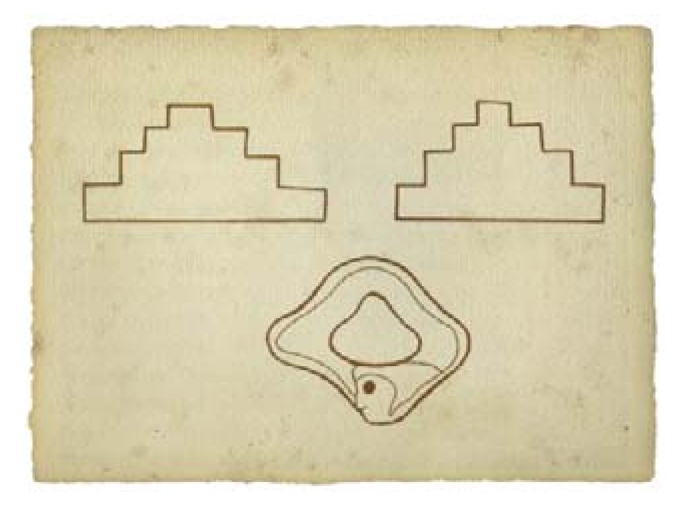


Noguera y José R. Pérez excavaron un segundo túnel de 116,5 metros de longitud que partía de la plataforma adosada, en el lado oeste; en el centro de la pirámide se encontraba con el túnel de Gamio. Ambas excavaciones concluyeron que no existía ninguna estructura interna que indicara una superposición de edificios, como es común encontrar en otras pirámides mesoamericanas. Se obtuvieron datos sobre el sistema de construcción; el material cerámico encontrado se analizó con el propósito de reconocer la posible existencia de dos o más culturas en el sitio.

En 1947, Remy Bastien llevó a cabo una investigación arquitectónica de la Pirámide del Sol. Dos años después excavó un túnel de nueve metros de profundidad con dirección sur-norte en el punto donde se unen los túneles de Gamio y Noguera. Sin embargo, no se conoce el informe arqueológico de este trabajo. Un decenio después, René Millon, Bruce Drewitt y James A. Bennyhoff reexaminaron los túneles de la pirámide en busca de datos sobre estructuras que pudiesen haber pasado inadvertidas hasta entonces. Millon señaló que no podían contradecirse las conclusiones previas sobre el diseño y la edificación de la pirámide, ni sobre los problemas sociales y técnicos que acompañaron su construcción.

En 1962, Robert Smith excavó otro túnel en dirección este-oeste de 30 metros de longitud; esta vez en la parte superior de la pirámide, en lo que correspondería al quinto cuerpo. Dentro de este túnel, Evelyn Rattray abrió en 1968 un pozo de sondeo con el propósito de encontrar cerámica que facilitara la datación de la pirámide. El arqueólogo Ponciano Salazar realizó excavaciones (1962-1964) en un túnel norte-sur de la plataforma baja en su lado norte. Sin embargo, tampoco se ha hallado ningún informe sobre esa intervención.

De acuerdo con los trabajos de excavación de túneles realizados en la Pirámide del Sol, el sistema constructivo de este monumento sería el siguiente. El interior parece estar compuesto de adobes, arcillas, tepetate y rocas de tamaño reducido, así como de una gran cantidad de tiestos y fragmentos de obsidiana. Se supone que la construcción de la Pirámide del Sol comenzó con la delimitación de la forma general del edificio mediante muros toscamente levantados con piedra y barro, tepetate o adobe; realizaban la función de muro de contención reforzado por contrafuertes. El segundo paso consistió en rellenar los espacios vacíos con piedra suelta y tierra, sin material de unión. Según el arqueólogo Rubén Cabrera, del mexicano Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH) quizá se utilizaran cajones de adobes para contener el relleno (como se usó en el Templo de Quetzalcóatl). Por fin, se añadió un recubrimiento de piedra pequeña; encima, una capa de concreto de unos 40 centímetros de espesor. Ignacio Marquina menciona que todos los cuerpos de la pirámide conservan restos de un grueso aplanado, que los debió cubrir en su totalidad; tal vez estaban pintados



5. LOS ORACULOS se alojaban, muy a menudo, en cuevas. Apoyados en ese dato, suponemos que en la cueva de lava debajo de la Pirámide del Sol habría un oráculo. De hecho, el Códice Xólotl muestra el glifo de Teotihuacan representado por dos pirámides sobre un oráculo dentro de una cueva.

R. ALFARO, E. BELMONT MORENO, A. CERVANTES, V. GRABSKI, J. M. LOPEZ ROBLES, L. MANZANILLA, A. MARTINEZ DAVALOS, M. MORENO Y A. MENCHACA ROCHA



LAURA CAUBET ARNAU

de algún color u ornamentados con murales. El terreno donde se asienta la pirámide era de humus; debajo de esa capa de tierra vegetal, otra de tepetate, mucho más firme, aguantaba el peso del monumento.

El túnel subterráneo

En 1971 se localizó, al pie de la Pirámide del Sol, un pozo de siete metros de profundidad lleno de piedras y cascajo. Al remover el material se descubrió una escalera antigua que llevaba hasta un túnel situado justo debajo de la pirámide. Este hallazgo dio comienzo a los trabajos de investigación de Jorge Acosta y Doris Heyden, del INAH. El túnel, que corre en dirección poniente con una ligera desviación al norte, se consideró entonces de origen natural; hoy sabemos que fue construido por los habitantes del valle. En la opinión de Heyden, el túnel ya existía cuando la Pirámide del Sol se construyó, pues la entrada coincide con el centro de la escalera de la pirámide.

De unos 103 metros de largo, el túnel termina en un conjunto de cámaras situadas casi debajo de la cima del monumento. El complejo consta de cuatro cavidades que le dan forma de flor. El túnel sufrió varias modificaciones con el propósito de transformar el acceso a las cámaras: se levantó una serie de muros, que fueron seccionando y tapando el camino; también se construyeron techos. Este proceso se realizó desde el fondo hacia la entrada. Restos de canales de piedra se han hallado al final del cuarto pasaje; posiblemente guardaban relación con el culto al agua.

Hugh Harleston Jr., George T. Baker y sus colaboradores presentaron en 1974 una descripción y reconstrucción hipotética del túnel subterráneo. Este trabajo reviste interés porque ofrece una descripción detallada con datos topográficos y medidas de cada sección, así como una relación de los materiales encontrados y de algunos elementos como muros y canales. Baker y Harleston localizaron el centro del complejo de cámaras en el punto exacto debajo del cuarto cuerpo de la pirámide: a 37,5 metros al oeste respecto del punto central y a 11,9 metros al sur con relación al oeste astronómico. Según Heyden, entre 25 y 30 muros taparon la entrada del túnel; estos autores, en cambio, sostienen que fueron sólo entre 19 y 20. Se han hallado pruebas de que estas paredes fueron destruidas por saqueadores. Para su reconstrucción hipotética, Baker y Harleston la dividieron en 4 secciones.

Heyden plantea la posibilidad de que el túnel debajo de la Pirámide del Sol corresponda a una representación de un Chicomoztoc (sistema de siete cuevas), ya que en algunos códices aparecen representados grupos de cuevas en forma de flor, muy semejantes al conjunto de cámaras hallado bajo la pirámide. Además, los oráculos se situaban con frecuencia dentro de cuevas. De hecho, en el Códice Xólotl, del Posclásico, el glifo de Teotihuacan aparece representado por dos pirámides encima de una cueva que encierra un oráculo. El oráculo debió operar como centro de actividades y ceremonias religiosas, que atraían a un gran número de peregrinos a la ciudad.

Otra hipótesis sostiene que el túnel se abrió con el propósito de marcar el lugar preferido para la construcción de un edificio, el asentamiento de un pueblo o la excavación de una tumba. La forma floral del conjunto de cavernas nos remite al significado religioso que tomaba en Teotihuacan el símbolo de la flor. Se utilizaba para representar la creación, la vida, el lenguaje, el canto, la nobleza, el gobierno y algunos dioses; era también un signo calendárico. Posiblemente la forma de flor de cuatro pétalos del túnel guarde relación con los cuatro puntos cardinales; tendría, pues, un significado cosmológico.

Los señores de Teotihuacan

Se desconoce quién o quiénes gobernaron Teotihuacan. No existe acuerdo sobre el sistema de poder. Algunos opinan que se basó en una sola dinastía. Sin embargo, la teoría más aceptada sugiere que se habría instaurado un cogobierno de varios señores; los restos de esos personajes yacerían en el interior de las mayores estructuras de la urbe, la Pirámide del Sol y la Pirámide de la Luna. En esta última se realizaron trabajos

de investigación a cargo de Rubén Cabrera y Saburo Sugiyama, de la Universidad estatal de Arizona. Los enterramientos y ofrendas hallados en el interior apoyan la hipótesis anterior.

La conformación de la Pirámide de la Luna es bastante distinta de la del Sol; resulta difícil, por tanto, estimar la probabilidad de que ésta encierre restos similares a las tumbas descubiertas en aquélla. Cabe agregar que, como en la Pirámide de la Luna, en Teotihuacan es común hallar entierros en fosas con muros de roca y rellenas de tierra. Como veremos más adelante, construcciones de este tipo serían más difíciles de localizar mediante la atenuación de muones, pues esta técnica resulta más eficiente para la detección de cavidades (huecos) que de estructuras de mayor densidad.

En resumen, el propósito que motivó la construcción del mayor monumento teotihuacano permanece oculto. Este enigma ha inspirado numerosos estudios, entre ellos varias excavaciones que han reforzado la hipótesis de que la Pirámide del Sol fue concebida sin edificaciones intermedias, a diferencia de la vecina Pirámide de la Luna. Así, la ausencia de una estructura interna ha dejado a los arqueólogos sin una pista que guiara futuras excavaciones. Una situación similar se presentó en la ciudad egipcia de Giza. Al contrario de la Pirámide de Keops, la de Kefrén no daba indicios de contener cámaras mortuorias en su volumen, más allá de la Cámara de Belzoni, ubicada en su base, cerca del eje de simetría. De ahí que Luis Alvarez propusiera el uso de la técnica de atenuación de muones, mediante la instalación de un detector de partículas en la Cámara de Belzoni.

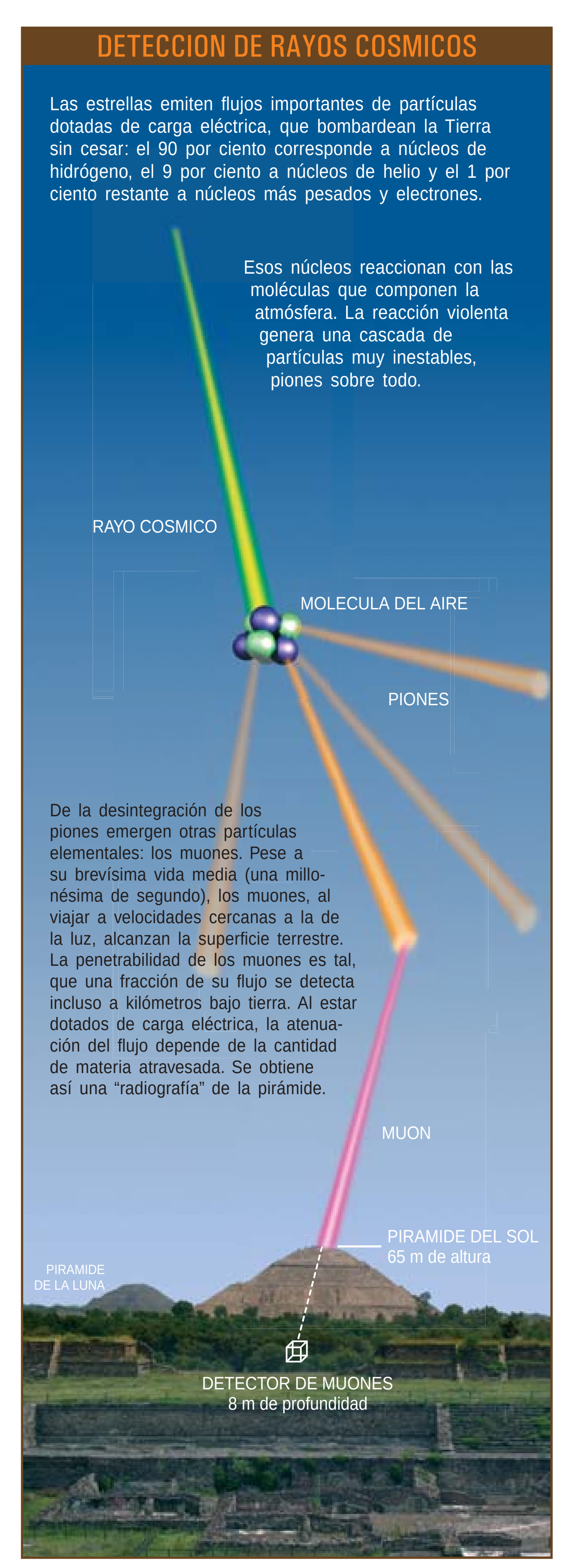
Rayos cósmicos y muones

Los muones, partículas elementales inestables, se inscriben en el grupo de los leptones. De carga eléctrica igual a la del electrón, tienen una vida media muy corta (una millonésima de segundo). La técnica utilizada en este estudio se centra en los muones que resultan de la interacción entre rayos cósmicos y atmósfera terrestre. La penetrabilidad de los muones así producidos es tal que una fracción de su flujo se detecta incluso a kilómetros bajo tierra. Al estar dotados de carga eléctrica, la atenuación del flujo depende de la cantidad de materia atravesada.

Un flujo de radiaciones estelares bombardea la Tierra sin cesar. Son producto de las reacciones nucleares que ocurren en el interior de las estrellas. La fuerza que mantiene unidos a los núcleos atómicos es tan intensa, que, para arrancar uno de los componentes nucleares (un protón o un neutrón), hay que invertir una energía millones de veces mayor que la necesaria para ionizar un átomo. Esa misma energía se recobra (por conservación) en la fusión nuclear que se produce en las estrellas: núcleos ligeros se unen para formar otros de mayor peso, obligados por la compresión que ejerce sobre ellos la atracción gravitatoria.

Las estrellas vienen a ser reactores nucleares naturales, que emiten radiaciones de muy diverso tipo, incluida la luz que observamos en el cielo nocturno o que, en el caso del Sol, sustenta la vida en la Tierra.

Al final de su vida, algunas estrellas explotan formando supernovas que producen flujos importantes de



SAMUEL PALACIN FABREGAS (*fotografía*)

partículas dotadas de carga eléctrica, algunas de energía elevada. El 90 por ciento de las mismas corresponde a núcleos de hidrógeno (protones), el 9 por ciento a núcleos de helio y el 1 por ciento restante a núcleos más pesados y electrones. Para bien de quienes habitamos en la superficie terrestre, hay dos escudos naturales que nos protegen de estas partículas: la atmósfera y el campo geomagnético. El efecto combinado de ambas pantallas hace que sólo una fracción de las radiaciones cósmicas llegue a la superficie terrestre. Esa fracción resulta mínima en la región ecuatorial, donde el apantallamiento ejercido por el campo magnético es mayor.

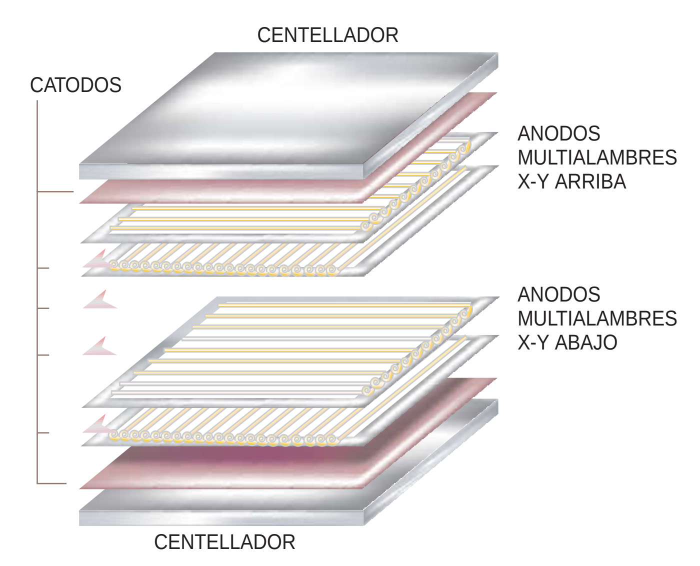
Cabría esperar que, lo mismo que la luz visible, las radiaciones ionizantes que produce el Sol dominaran sobre las provenientes del resto de las estrellas. Sin embargo, la radiación solar carece de energía suficiente para vencer los escudos protectores terrestres. Los rayos cósmicos que nos conciernen aquí son, pues, de origen extrasolar.

Respecto al flujo de núcleos (de hidrógeno, helio, etcétera) que incide sobre la latitud de la ciudad de México, el cociente entre la energía cinética más probable (E) y el número másico del núcleo (A) toma un valor cercano a 8 gigaelectronvolt (GeV). A partir de esta energía, el flujo de iones decrece de forma exponencial conforme aumenta la relación E/A. En la interacción entre esos núcleos y las moléculas que componen la atmósfera, ocurren reacciones violentas que producen partículas muy inestables, los piones.

A nivel del mar, el flujo de muones es de uno por centímetro cuadrado y minuto. En ese flujo se incluyen muones positivos y negativos, siendo los segundos ligeramente más abundantes. En la latitud del Valle de México, los muones presentan una energía cinética media cercana a los 2 GeV. Al igual que los rayos cósmicos que los originan, el flujo de muones de mayor energía decrece de forma exponencial. Respecto a la vertical, el flujo varía poco para ángulos polares inferiores a 45 grados; para inclinaciones mayores cae en picado.

Atenuación de muones

La técnica de localización de cavidades por atenuación de muones se basa en dos conceptos elementales. El primero es que la tasa $\Delta E/\Delta X$ a la que las partículas dotadas de carga eléctrica pierden una energía cinética ΔE al cruzar un espesor ΔX de un material cualquiera, corresponde a una función inversa de la velocidad de la partícula incidente. Puesto que estos muones viajan a velocidades próximas a la de la luz en el vacío c (límite absoluto de velocidad), $\Delta E/\Delta X$ resulta ser casi constante y cercana a 1 GeV por cada 2 metros de tierra atravesados. Por tanto, los 73 metros que deben penetrar los muones en este experimento (65 metros de altura de la Pirámide del Sol, más los 8 metros de profundidad del túnel) implican una energía mínima de incidencia de 36 GeV para que puedan detectarse en el túnel bajo el monumento. Dado que el flujo de partículas decrece exponencialmente al aumentar su energía, los muones que porten energía apenas suficiente para cruzar la pirámide serán los más sensibles a pequeñas variaciones en la cantidad de materia atravesada.



6. **EL DETECTOR DE MUONES** consta de una serie de elementos. En los extremos superior e inferior, dos plásticos centelladores registran el paso de radiación: cuando ambos se activan a la vez (coincidencia temporal), la señal se considera válida (las demás señales no se deben a la llegada de un muon sino al ruido ambiental). Las cámaras multialámbricas determinan la trayectoria del muon: el punto por donde cruza el muon en cada cámara define las coordenadas x e y; la separación entre las cámaras define la tercera coordenada z.

R. ALFARO, E. BELMONT MORENO, A. CERVANTES, V. GRABSKI, J. M. LOPEZ ROBLES, L. MANZANILLA, A. MARTINEZ DAVALOS, M. MORENO Y A. MENCHACA ROCHA

El segundo concepto clave concierne a la pérdida de energía, que resulta de las interacciones individuales entre las partículas que componen al material. Cada uno de estos "choques" causa una pequeña desviación del rayo incidente. Puesto que la desviación promedio es también función inversa de la velocidad, los muones de menor energía son los más sensibles para la localización de huecos y acumulan una mayor desviación, lo que repercute en la resolución espacial. El diseño de este tipo de experimentos requiere, pues, un compromiso entre la sensibilidad y la resolución espacial.

Para la localización de cavidades ocultas se miden el flujo y la dirección de los muones que llegan al detector. Estas medidas se comparan luego con el resultado de una simulación en la que el volumen investigado tiene una densidad uniforme: si en alguna dirección se detecta un flujo de muones superior al simulado, ello indica que en esa dirección habrá menos materia y, por tanto, quizás exista una cavidad.

La construcción de un modelo teórico requiere un conocimiento preciso de las condiciones experimentales: distribución energética y angular de los muones incidentes, geometría externa de la pirámide y estructura interna (perfil de densidad, cavidades conocidas, etcétera). A partir de estos datos se deducen las dimensiones de la mínima cavidad detectable, los tiempos de medición y otros parámetros.

La información que se obtiene en una tal simulación facilita el diseño del detector. El dispositivo experimental que utilizamos en este estudio recuerda el de Alvarez: es simple y de bajo costo. Para determinar tres puntos a lo largo de la trayectoria de los muones, se emplean seis



R. ALFARO, E. BELMONT MORENO, A. CERVANTES, V. GRABSKI, J. M. LOPEZ ROBLES, L. MANZANILLA, A. MARTINEZ DAVALOS, M. MORENO Y A. MENCHACA ROCHA

7. EQUIPO EXPERIMENTAL para la detección de muones. A la derecha, el conjunto de las seis cámaras multialámbricas con los dos centelladores. Abajo a la izquierda, la electrónica necesaria para realizar el análisis en tiempo real que se requiere para determinar la trayectoria de los muones. Arriba a la izquierda, el sistema de control de gases que alimenta las cámaras multialámbricas.

cámaras multialámbricas (CMA) con una zona sensible de 1 metro × 1 metro. Estas se colocan por pares, con los alambres de una cámara perpendiculares a los de la siguiente. Se determinan así un par de coordenadas (x,y); la ubicación vertical fija la tercera coordenada (z). Los muones se identifican mediante dos centelladores plásticos que cierran, a modo de "sándwich" (uno encima y otro debajo), el conjunto de cámaras multialámbricas. Los muones son las únicas partículas capaces de atravesar por completo el detector. Así, para eliminar el ruido de fondo, causado por la radiación ambiental, se consideran sólo las señales que presentan coincidencia temporal en ambos centelladores; los dos se activan a la vez. La simulación determina el espaciamiento entre los alambres en las CMA y otros parámetros de importancia para el dispositivo de detección.

De una comparación teórica entre el dispositivo experimental que Alvarez utilizó en Giza y el que se ha instalado en Teotihuacan se desprende que, para tiempos de observación iguales, el proyecto mexicano obtendrá un recuento semejante, aunque con un detector menor; la superficie de éste corresponde a una cuarta parte de la superficie del empleado por Alvarez. Ello se debe, en parte, a la diferencia de altitudes: el flujo de muones es mayor en Teotihuacan que en Giza, que se encuentra al nivel del mar. Además, la menor altura de la Pirámide del Sol (la mitad de la de Kefrén) implica una atenuación reducida. Asimismo, la sensibilidad que se espera en el experimento mexicano es mayor que en el caso egipcio; por una razón poderosa: una cavidad de una misma dimensión representa, en un caso, una fracción mayor de la altura total que en el otro. Otra ventaja del estudio en la Pirámide del Sol se debe a los túneles internos, que sirven de estructuras de calibración.

Sin embargo, el experimento mexicano presenta otros retos. La forma externa de la pirámide es más compleja, y difícil de simular, que la de Kefrén. La densidad interna tiene asociada una mayor incertidumbre que en el caso egipcio, donde los materiales de construcción se conocían mejor. Por último, a juzgar por lo que se observa en los muros del túnel que lleva a la Cámara de Belzoni y en Keops, los materiales presentan una distribución más uniforme.

Tomando en cuenta las consideraciones anteriores, estimamos que necesitaríamos un año de mediciones para detectar cavidades con una altura mínima de 75 centímetros. Cabe aclarar que el hallazgo de una cavidad en esta montaña de tierra quizá no tenga interés arqueológico, si se trata de un simple asentamiento geológico.

Puede ocurrir también que la estructura arqueológica de la Pirámide del Sol no corresponda a un hueco, sino a una tumba llena de tierra, como ya se ha encontrado

en la Pirámide de la Luna. Si bien esta técnica permite localizar zonas con una densidad superior a la media, ofrece una sensibilidad menor; asimismo, podría implicar tiempos de medida demasiado largos. Y, de encontrar indicios de una estructura, la falta de estereoscopía inherente a los resultados de un solo punto de observación obligaría a desplazar la posición del detector a lo largo del túnel y repetir las mediciones para mejorar la ubicación tridimensional.

El proyecto de medición de atenuación de muones en la Pirámide del Sol se divide en varias etapas. Contamos ya con el diseño de los dos tipos de detectores (cámaras multialámbricas y centelladores), la adquisición de los módulos de electrónica, y la construcción, ensayo e instalación *in situ* de las dos placas centelladoras. La primera cámara multialámbrica se construyó y ensayó con éxito en 2005; en 2006 se construyeron las otras cinco. El detector completo se encuentra ya integrado y en fase de calibración. También se ha acondicionado un espacio en el túnel de la pirámide: seguro, electrificado (la toma de electricidad más cercana se encuentra a un kilómetro de distancia) y con baja humedad. Nos proponemos ahora la instalación de una conexión inalámbrica de transmisión de datos y control telemétrico.

Por fin, cabe reseñar que la colaboración multidisciplinar de arqueólogos, físicos e ingenieros en este proyecto ha resultado un reto enorme y muy gratificante para todos los participantes. Más allá de la lista de autores, se ha contado con la participación de numerosos colaboradores anónimos. A todos estos voluntarios, en especial a los estudiantes de licenciatura y a los técnicos, ofrecemos nuestra gratitud.

Los autores

Arturo Menchaca y **Linda Manzanilla** son los responsables del proyecto que se describe en el artículo. Menchaca dirige el Instituto de Física de la Universidad Nacional Autónoma de México. Manzanilla es investigadora del Instituto de Investigaciones Antropológicas de la UNAM. **Rubén Alfaro**, **Ernesto Belmont**, **Varlen Grabski**, **Arnulfo Martínez** y **Andrés Sandoval** son investigadores del departamento de Física Experimental de la UNAM. **Matías Moreno** pertenece al departamento de Física Teórica de la UNAM. **Azucena Cervantes** es arqueóloga y estudiante de doctorado en el Instituto de Física. **J. Manuel López** es doctor en ingeniería.

Bibliografía complementaria

EXPLORACIÓN Y CONSOLIDACIÓN DE MONUMENTOS ARQUEOLÓGICOS EN TEOTIHUACAN. L. Batres, México, 1908.

LA POBLACIÓN DEL VALLE DE TEOTIHUACAN. M. Gamio, 3 vols. Secretaría de Fomento; México, 1922.

SEARCH FOR HIDDEN CHAMBERS IN THE PYRAMIDS. L. W. Alvarez, J. A. Anderson, F. E. Bedewi, J. Burkhard, A. Fakhry, A. Girgis, A. Goneid, F. Hassan, D. Iverson, G. Lynch, Z. Miligy, A. H. Moussa, M. Sharkawi, y L. Yazolino en *Science*, vol. 167, págs. 832-839, 1970.

TEOTIHUACAN 80-82: PRIMEROS RESULTADOS. Dirigido por R. Cabrera, I. Rodriguez y N. Morelos, Instituto Nacional de Antropología e Historia; México, 1991.

TEOTIHUACAN. E. Matos en *Arqueología Mexicana*, vol. II, n.º 4, págs. 75-79, 1994.

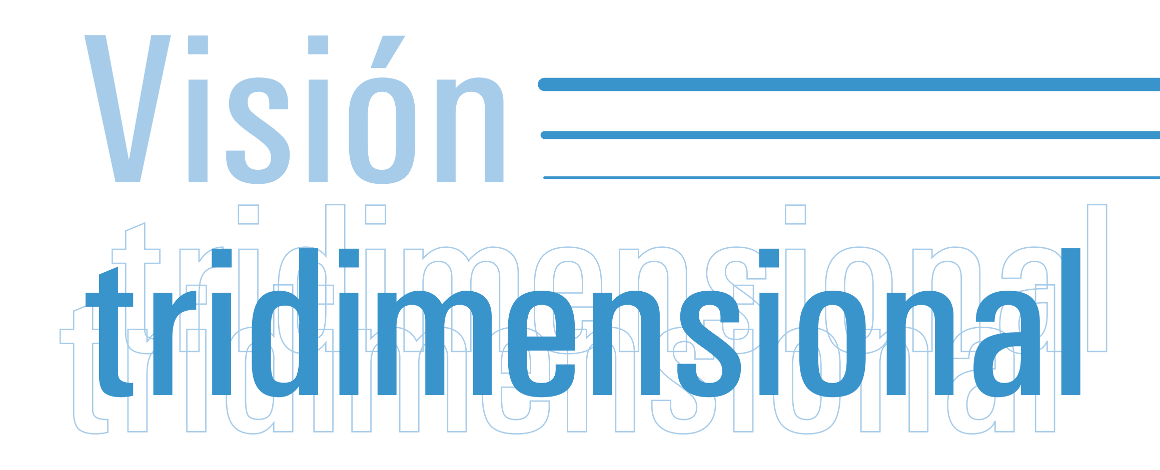
ZONA DEL ALTIPLANO CENTRAL CLÁSICO. Linda Manzanilla en *Historia Antigua de México*, dirigido por Linda Manzanilla y Leonardo López Luján, INAH-UNAM-Miguel Angel Porrúa, vol. II, págs. 203-239, 2001.

GOBIERNO CORPORATIVO EN TEOTIHUACAN: UNA REVISIÓN DEL CONCEPTO DE “PALACIO” APLICADO A LA GRAN URBE PREHISPÁNICA. Linda Manzanilla en *Anales de Antropología*, vol. 35, págs. 157-190; UNAM, 2002.

A MUON DETECTOR TO BE INSTALLED AT THE PYRAMID OF THE SUN. R. Alfaro-Molina, E. Belmont-Moreno, A. Cervantes, V. Grabsky, J. M. López-Robles, L. Manzanilla, A. Martínez-Dávalos, A. Menchaca-Rocha y M. Moreno en *Revista Mexicana de Física*, vol. 49, supl. 4, págs. 54-59; 2003.

IMPROVING MEPC DELAY LINE READOUT BY WAVEFRONT ANALYSIS. J. M. López-Robles, R. Alfaro-Molina, E. Belmont-Moreno, V. Grabsky, A. Martínez-Dávalos y A. Menchaca-Rocha en *IEEE Transactions on Nuclear Sciences*, vol. 52, págs. 2841-2845; 2005.

Tras varios decenios de espera, al fin tenemos aparatos que exhiben objetos reales en tres dimensiones



Visión tridimensional

Stuart F. Brown

Desde hace años los ingenieros se esfuerzan por desarrollar dispositivos que representen en tres dimensiones imágenes vívidas, interactivas y susceptibles de manipulación. Los químicos aplicarían esa técnica al diseño de fármacos. Las compañías petroleras a la ubicación exacta del lugar donde perforar para la extracción de gas y petróleo. Los cirujanos la usarían para la planificación de intervenciones quirúrgicas: harían pasar sondas o haces de rayos a través de la sucesión de imágenes (cortes) que proporcionan la resonancia magnética (MR) y la tomografía computerizada (TAC). Pero los aparatos ideados hasta ahora adolecen de algunos inconvenientes: el parpadeo de la imagen, la estrechez del campo visual y la necesidad de utilizar gafas especiales.

En fecha reciente se han superado tales limitaciones merced a unos sistemas interactivos de visión volumétrica tridimensional. Los han creado dos compañías que han combinado sus propias técnicas con componentes del mercado, como el chip procesador digital de luz (DLP, de "Digital Light Processor") de Texas Instruments. Los productos de esas dos firmas están ahora pasando de la fase experimental a la comercial.

Algoritmos rotatorios

Es cierto que los hologramas ofrecen imágenes tridimensionales (3D) y visibles sin necesidad de gafas, pero corresponden a grabaciones únicas de una imagen definitiva, es decir, no admiten interactividad. Asimismo, mediante el entramado de cubos y redes giratorias de diodos fotoemisores se ha conseguido una visión corpórea, aunque con definición grosera, limitada por las conexiones entre los diodos. Otros sistemas competidores parecen tridimensionales, sin serlo en realidad. A modo de botón de muestra, el Heliodisplay de IO2 Technology de San Francisco, que proyecta imágenes flotantes en un plano vertical de niebla fina suspendido sobre el instrumento: parece que posee profundidad, pero se trata de una sensación ilusoria, creada por la ausencia de referencias en esa dimensión, mas no por imágenes reales.

Los usuarios que deseen cargar en un equipo de representación tridimensional datos clínicos un día, otro día datos militares y luego transformarlos, editarlos y manipularlos mientras están a la vista pueden aprovecharse de dos inventos "volumétricos": Perspecta y DepthCube.

El sistema Perspecta, desarrollado por Actuality Systems en Bedford, podría compararse con una bola de cristal para mirar en el interior de los objetos. Dentro de una cúpula de policarbonato transparente se aloja una pantalla plana, en forma de disco de 10 pulgadas (unos 25 centímetros) de diámetro, que gira a 900 revoluciones por minuto sobre un eje vertical. El sistema acepta los datos generados por TAC, RM o PET (tomografía por emisión de positrones); divide la información en 198 segmentos dispuestos radialmente, como finas rodajas en torno del corazón de una manzana. Esas rodajas de datos, almacenadas en una memoria intermedia de tra-

ANGULO DE ATAQUE: Los datos procedentes de una exploración por TAC se proyectan en tres dimensiones mediante el PerspectaRad. Se detecta así el núcleo de un tumor cerebral (*diamante amarillo, en el centro*) y las posibles trayectorias para la radioterapia (*rayos verdes*).



mas ("framebuffer"), se cargan en tres chips DLP. Los chips constan de cientos de miles de espejos diminutos, orientables individualmente por circuitos incorporados; constituyen el núcleo de televisores de imagen proyectada y de nuevos proyectores de transparencias, así como de proyectores digitales que pudieran sustituir a los rollos de película en salas de espectáculos. A cada DLP de Prospecta se le asigna un color; su luz se proyecta a través de un prisma sobre una pantalla en rápida rotación, lo que produce una imagen tridimensional.

El desarrollo de Perspecta requirió una tenaz labor matemática. Según declaró Gregg Favalora, de Actuality, tardaron tres o cuatro años en programar los algoritmos de segmentación de los datos de la imagen. Tuvieron que patentar un método para el trazado de líneas rectas sobre una pantalla en rotación, pues no es tarea sencilla elegir un punto en la pantalla al tiempo que ésta gira.

Perspecta crea una imagen brillante, semitranslúcida. Cada píxel volumétrico (vóxel) que parece estar situado en un determinado punto del espacio está allí realmente, pero se hace visible sólo cuando la pantalla arroja luz sobre ese punto; de ahí la exigencia de una rotación célere. La pantalla es de un plástico que parece papel de seda; refleja la luz en un 50 % y la transmite en un 50 %, lo que permite contemplar las imágenes desde cualquier ángulo a su alrededor. La unidad proporciona efecto de paralaje vertical y horizontal, como en el mundo real: cuando el observador mueve la cabeza a un lado u otro, o de arriba abajo, aparecen objetos antes ocultados por otros situados en primer plano.

Mediante un ratón en forma de lápiz, el usuario se adentra o sale de la imagen, la gira y la desplaza, o cambia su color. Esa propiedad se ha conseguido en fecha muy reciente merced a los rápidos avances en infografía. Como recuerda Favalora, en la primera demostración del producto en 2002 se invirtieron 45 minutos de procesamiento en realizar un sencillo clic y arrastre, mientras que ahora se consigue lo mismo con una tarjeta de vídeo de unos cientos de dólares.

Favalora y su equipo tardaron, además, algún tiempo en comprender que, para lanzar un producto comercial, no bastaba con el perfeccionamiento de las técnicas esenciales: había que identificar un mercado potencial y desarrollar un sistema listo para usar y a la medida de los clientes. La aplicación comercial resultó ser la radioterapia para tumores cancerosos.

Los médicos necesitan determinar con sumo cuidado la trayectoria de los haces de radiación, para que el efecto letal de la misma sea máximo sobre el tumor diana y mínimo sobre los tejidos sanos circundantes. Puesto que los oncólogos trabajan con las imágenes bidimensionales (cortes) que obtienen mediante técnicas tomográficas, puede tardarse horas enteras en planificar las trayectorias de radiación para un tratamiento. Actuality desarrolló su sistema PerspectaRad para que se pudiera incorporar en el equipo de radioterapia que fabrica Philips Medical Systems.

PerspectaRad incluye la pantalla tridimensional más el software que conecta el dispositivo a los sistemas de Philips. Cuando el médico oprime un pulsador, aparece una imagen tridimensional de los datos tomográficos de un tumor cerebral, por ejemplo. Otro pulsador añade las trayectorias de radiación elegidas a partir de una planificación dosimétrica del tratamiento. El especialista determina así el punto exacto sobre el tumor donde incidirán las radiaciones, los tejidos sanos que atravesarán y la

nube irradiada, es decir, el volumen de tejido afectado por la radiación. Esas imágenes tridimensionales facilitan el ajuste de las radiaciones para la mejora del tratamiento y la reducción del daño. Los primeros sistemas PerspectaRad cuestan alrededor de 90.000 dólares (unos 70.000 euros); producidos a mayor escala, podrían bajar su precio hasta los 65.000 dólares, pero las pantallas difícilmente llegarán a los mercados de consumo.

No obstante, el tratamiento sigue en auge. James Chu, director del departamento de física médica en el hospital de la Universidad Rush en Chicago, estudió 12 pacientes con tumor cerebral cuyo tratamiento se había planificado mediante PerspectaRad y métodos estándar. Los planes fueron revisados por médicos que no sabían cuál método se había utilizado. Los protocolos desarrollados mediante PerspectaRad dieron mejores resultados en seis de los casos, equivalentes en cuatro y peores en dos. En uno de los pacientes, PerspectaRad aclaró cómo podía reducirse el daño accidental causado al nervio óptico.

Chu prepara ahora un trabajo más amplio, que incluirá pacientes afectados de tumoración en otras partes del cuerpo. "Si trabajas sólo con datos tomográficos", afirma, "tienes que examinar cortes individuales y tratar de integrar todos ellos en tu cabeza para conseguir una imagen tridimensional. Con Perspecta, en cambio, ves directamente esa imagen."

A Chu le interesa también la representación de movimientos internos que ofrece Perspecta. Hay órganos y tejidos humanos que se mueven al latir el corazón y respirar los pulmones; conviene, pues, discernir cuál es el eje de movimiento de un tumor. Un médico que posea tal información dirigirá un haz de radiación de menor energía a lo largo del eje de movimiento, en vez de un haz más intenso que lo atraviese, con lo que disminuirá el daño colateral. Chu señala que Perspecta facilitaría el implante acertado de "simientes" radioactivas en la próstata para el tratamiento local del cáncer: ello compensaría el desplazamiento de tejidos que produce la inserción de la aguja que deposita las simientes.

PERSPECTA: UNA BOLA DE CRISTAL

El conjunto de cúpula transparente, pantalla translúcida y sistema óptico gira a 900 rpm para crear una imagen tridimensional. Un ordenador envía datos gráficos a la circuitería electrónica situada bajo el pedestal; ésta ordena a tres chips procesadores que concentren los rayos luminosos de una lámpara de arco a través de una lente proyectora. El haz es reflejado hacia la pantalla a través del eje giratorio y de espejos repetidores. Una segunda cúpula, más amplia (*no mostrada*), rodea, por motivos de seguridad, las piezas que giran.



5WINFOGRAPHICS; FUENTE: ACTUALITY SYSTEMS

Vóxeles en placas de vidrio

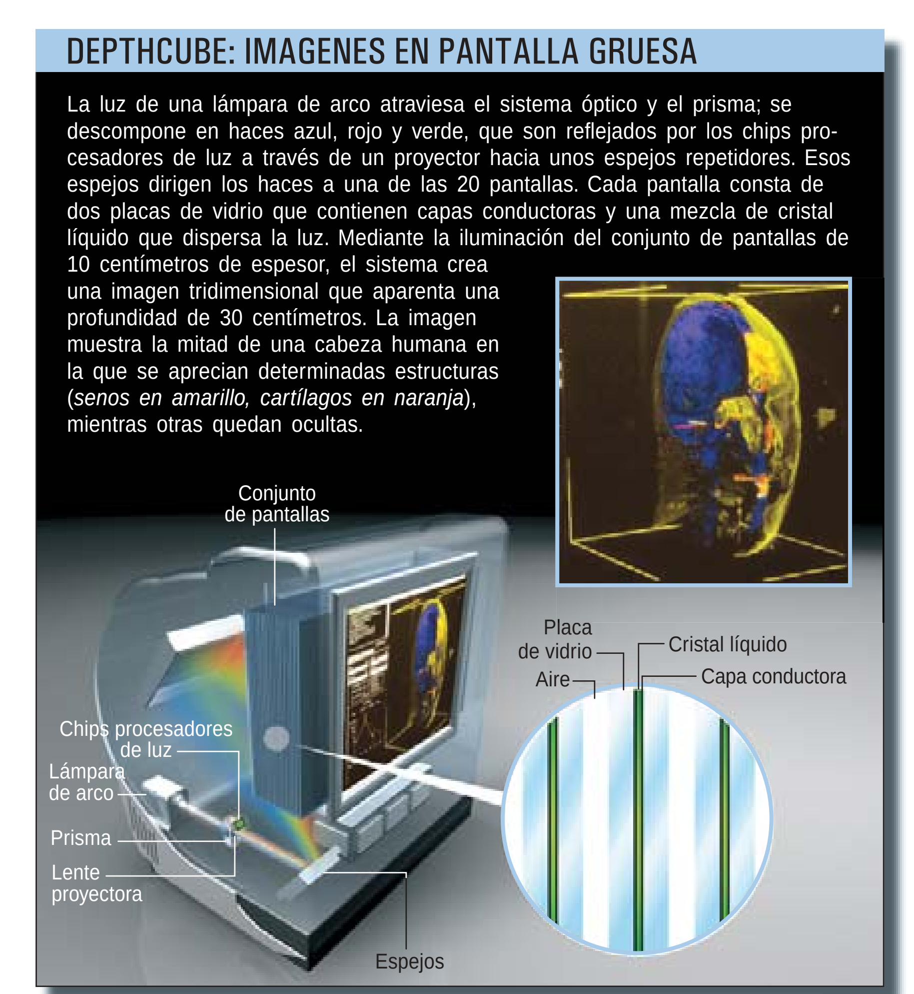
DepthCube, el otro visualizador volumétrico interactivo, fue desarrollado por Light-Space Technologies de Norwalk, en Connecticut. En esencia, corresponde a un monitor de retroproyección cuyo aspecto recuerda un terminal de ordenador, con una ventana de 16 por 12 pulgadas. Su pantalla tiene un grosor de cuatro pulgadas (10 centímetros) y consta de 20 placas de vidrio apiladas. Las imágenes obtenidas, sin embargo, aparentan una profundidad de unas 12 pulgadas (30 centímetros). Una persona situada ante la pantalla en una posición cualquiera verá los objetos desde la perspectiva individual que le corresponda. Las estructuras internas aparecerán y desaparecerán según varíe el ángulo de visión del observador. Del sistema podría aprovecharse, entre otros, el ingeniero de productos que necesitara saber si las piezas dibujadas en un sistema diseñado por ordenador encajan o no unas con otras.

Con su primer prototipo construido hace ocho años, Alan Sullivan, presidente de LightSpace, consiguió que un trío de chips DLP de Texas Instruments proyectase imágenes en relieve en las 20 placas, que están separadas por finos intersticios de aire. Cada DLP de DepthCube contiene 786.432 espejos que embaldosan una superficie similar a la de una uña de la mano.

Todavía necesitaba Sullivan un procedimiento para generar la información que define el relieve del objeto rerpresentado; con gran satisfacción observó que podría servirse de una tarjeta comercial de gráficos en tres dimensiones, de coste asequible. Las tarjetas gráficas utilizan una zona tampón de la memoria, para asignar a cada píxel el color adecuado

DEPTHCUBE: IMAGENES EN PANTALLA GRUESA

La luz de una lámpara de arco atraviesa el sistema óptico y el prisma; se descompone en haces azul, rojo y verde, que son reflejados por los chips procesadores de luz a través de un proyector hacia unos espejos repetidores. Esos espejos dirigen los haces a una de las 20 pantallas. Cada pantalla consta de dos placas de vidrio que contienen capas conductoras y una mezcla de cristal líquido que dispersa la luz. Mediante la iluminación del conjunto de pantallas de 10 centímetros de espesor, el sistema crea una imagen tridimensional que aparenta una profundidad de 30 centímetros. La imagen muestra la mitad de una cabeza humana en la que se aprecian determinadas estructuras (*senos en amarillo, cartílagos en naranja*), mientras otras quedan ocultas.



en una pantalla bidimensional. Pero incorporan también un componente escondido, el tampón de profundidad, que describe la profundidad de cada píxel. En la imagen plana que aparece en la pantalla de una aplicación normal, ese tampón apenas si interviene, pues la creación de una imagen bidimensional requiere definir sólo la capa superficial del píxel. Sullivan había encontrado, por tanto, un espacio "gratuito" donde almacenar los datos de profundidad.

Esa información dirige a las 20 placas, u obturadores por dispersión de cristal líquido, que cambian rápidamente del estado transparente al estado de dispersión. Esa propiedad permite a una placa dejar pasar píxeles a otras placas según se necesite, pero también le permite representar un píxel. En cualquier momento, todas las placas se hallan en blanco menos una, pero los procesadores proyectan en cada placa, a una velocidad de 50 veces por segundo, imágenes bidimensionales (cortes) coordinadas. Con ello se crea altura, anchura y profundidad en toda su plenitud.

El prototipo DepthCube transmitía al observador una agradable visión en relieve, aunque limitada a las cuatro pulgadas de profundidad de la pantalla; los elementos de la imagen aparecían casi como objetos bidimensionales de un decorado teatral, cada uno en un plano distinto. Fue entonces cuando Sullivan, que había estudiado los láseres de energías ultra-altas en el Laboratorio Nacional Lawrence Livermore, tuvo una idea genial que luego patentaría. Se le ocurrió que los algoritmos de antisolapamiento ("antialiasing") utilizados para suavizar los bordes en diente de sierra de las imágenes bidimensionales les servirían también para suavizar las transiciones entre los 20 planos de DepthCube.

La innovación consiste en intercalar 31 planos secundarios entre los 20 planos citados, de manera que aumenta la resolución aparente: los 15,3 millones de vóxeles físicos de la pantalla aparecen como 465 millones de vóxeles virtuales. El cerebro humano verá así imágenes con una profundidad de hasta 12 pulgadas.

Los datos de imágenes que se dirigen a los chips pueden proceder de casi cualquier software tridimensional que ejecute la interfaz de programación de aplicaciones OpenGL. Se trata de un protocolo común, que utilizan Catia, ProEngineer y otros programas de diseño e ingeniería por ordenador. LightSpace ha vendido ya unos cuantos DepthCube a institutos de investigación, como el Laboratorio de Investigación de las Fuerzas Aéreas estadounidenses y la Universidad de Hokkaido, a unos 50.000 dólares por unidad. Sullivan reconoce que ese precio limita el mercado, pero considera posible reducirlo a unos 5000 dólares. La arquitectura del producto en nada difiere de la de un televisor de retroproyección, salvo en los obturadores de cristal líquido, que podrían fabricarse en serie a un coste asequible.

Los productos que han desarrollado esas dos jóvenes firmas están ganando el respeto de los expertos del mundo de la representación visual tridimensional. Se espera que sigan con nuevas aplicaciones. El experto en óptica Steve Hines, dueño de HinesLab en Glendale, señala que esos dos grupos están llevando a cabo proyectos de suma complejidad. Y añade que los mercados naturales para la comercialización de esa técnica son precisamente los que tienen más dinero: el sector médico, el militar y el audiovisual.

El autor

Stuart F. Brown se ha especializado en la comunicación sobre temas aeroespaciales, de transportes y biotecnológicos.

Bibliografía complementaria

VOLUMETRIC 3D DISPLAYS AND APPLICATION INFRASTRUCTURE. Gregg E. Favalora en *Computer*, vol. 38, n.º 8, págs. 37-44; agosto de 2005.

A METHOD FOR THE REAL-TIME CONSTRUCTION OF A FULL PARALLAX LIGHT FIELD. K. Tanaka y S. Aoki en *Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems XIII*. Preparado por A. J. Woods y otros. *Proceedings of the SPIE*, vol. 6055, artículo 605516; 30 enero, 2006.

KELVIN, PERRY y la edad de la Tierra

Si los científicos hubieran tenido en cuenta a uno de los críticos coetáneos de Kelvin, la teoría de la deriva continental podría haberse aceptado varias décadas antes

Philip C. England, Peter Molnar y Frank M. Richter

Los científicos decimonónicos se enzarzaron en un prolongado debate sobre la edad de la Tierra. La respuesta definitiva no llegaría hasta mediados del siglo XX, gracias al perfeccionamiento de los métodos de datación radiactiva. La estimación de la edad de la Tierra más famosa —y equivocada— de la era victoriana fue obra del famoso físico William Thompson (1824-1907), conocido desde 1892 como Lord Kelvin.

Suele presentarse la historia de Kelvin y la edad de la Tierra como un combate entre David y Goliat. A los geólogos, armados con la endeble espada del razonamiento geológico, les toca el papel del contendiente que parecía condenado a perder. En el otro bando, Lord Kelvin utiliza la fuerza bruta y el prestigio de la física matemática. La derrota final de Kelvin se toma como demostración de que no pueden aplicarse razonamientos físicos sencillos a problemas geológicos complejos. Sin embargo, hay muchos modelos físicos sencillos que se han aplicado a la geología con enorme éxito explicativo.

Muchos creen que el cálculo de Kelvin fracasó porque ignoraba la radiactividad. En este artículo veremos que ése no fue su error. El problema del razonamiento de Kelvin fue advertido por uno de sus propios ayudantes, el académico, profesor e inventor John Perry, que intentó convencer infructuosamente a los científicos hegemónicos de que una transferencia de calor más eficiente en el interior de la Tierra —ya sea por convección u otros medios— podía reconciliar las explicaciones contrapuestas de la física y de la geología. Hoy cabe pensar que las ideas de Perry podrían haber acelerado considerablemente el progreso de la geología si los geólogos las hubieran entendido y tomado en consideración.

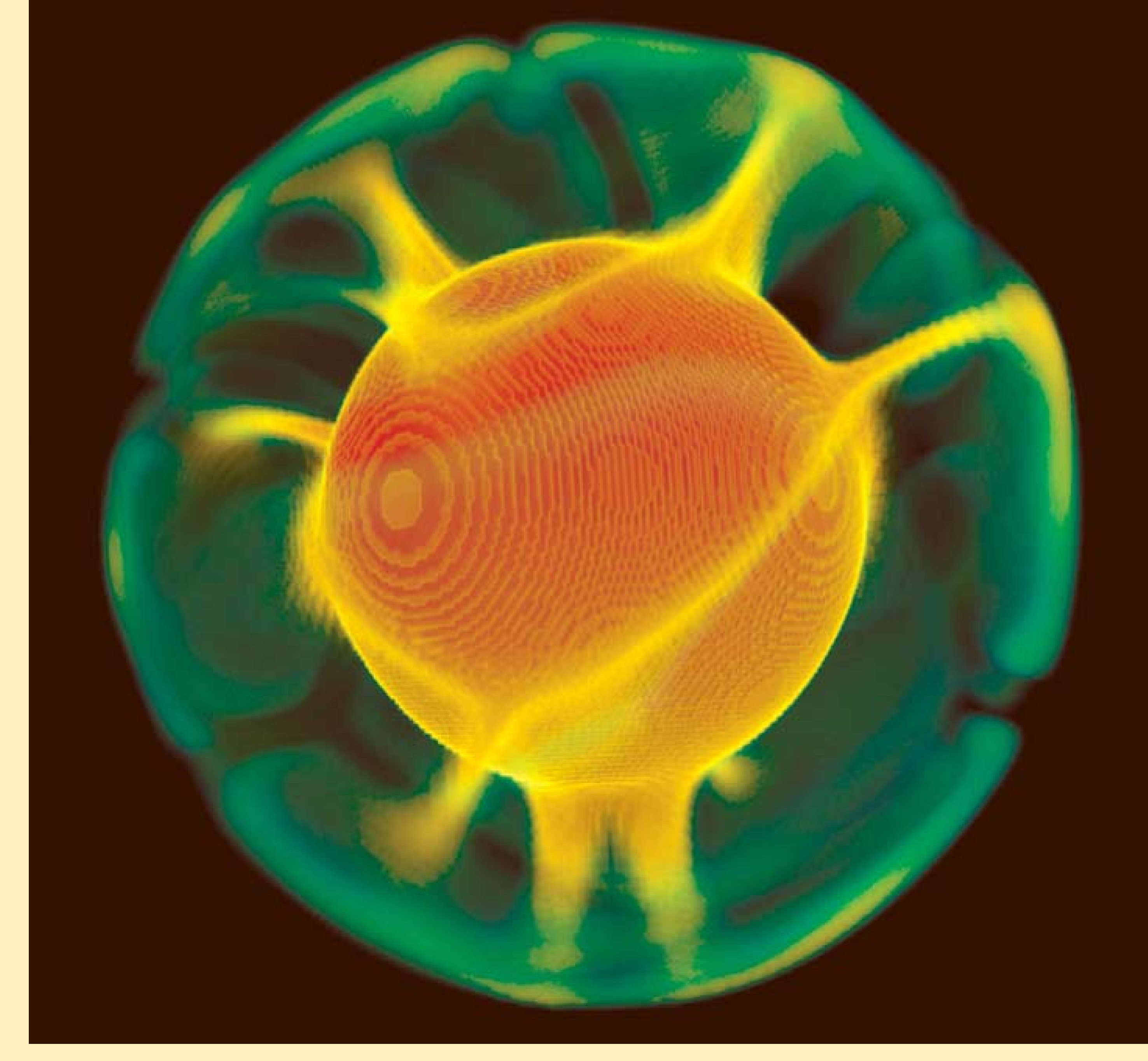
El enfriamiento de los planetas y de los pavos

El matemático francés Joseph Fourier (1768-1830) puso con su tratado *Théorie Analytique de la Chaleur* (1822) el fundamento cuantitativo de la estimación de la edad de la Tierra que Kelvin formularía más tarde. Kelvin empezó a trabajar en este campo cuando tenía 16 años, aclarando algunos aspectos de los cálculos de Fourier. Abordó el problema de la edad de la Tierra en 1844; demostró que la medición del ritmo de pérdida de calor de la Tierra a través de su superficie podría servir para acotar su antigüedad.

Kelvin pensaba que la Tierra se había solidificado a partir de un estado original fundido. Tomó, pues, como condiciones iniciales de su cálculo una temperatura alta y uniforme en todo el volumen, que después habría evolucionado hacia un estado en el que su superficie se mantenía a temperatura constante. Con estas premisas, la temperatura dependía de la profundidad respecto de la superficie y del tiempo transcurrido desde el estado original.

Para hacernos una idea de la física involucrada, realicemos un sencillo experimento mental. Imaginemos qué sucedería si introdujéramos un pavo recién salido del horno en el congelador (consideremos que se trata de un congelador perfecto, que puede deshacerse del calor de forma instantánea y permanecer siempre a la misma temperatura). Al principio, todo el volumen del pavo estaría a la misma temperatura (siempre que hubiese estado cociéndose durante un tiempo suficiente). Tan sólo una estrecha capa de piel adquiriría inicialmente la temperatura del congelador. Las capas superficiales del pavo irían enfriándose a medida que el calor escapara hacia el exterior, mientras que el centro del pavo mantendría la temperatura del horno. Al final, por supuesto, se enfriaría el pavo entero, relleno incluido. Es decir, la temperatura del pavo dependerá tanto de la distancia a la superficie como del tiempo que lleve en el congelador.

El análisis de Kelvin permite obtener resultados numéricos en este experimento mental. El ritmo al que el calor se difunde a través de una superficie es proporcional al gradiente (o derivada espacial) de la temperatura. Fourier demostró que los cambios de temperatura en



1. EN TIEMPOS NO MAS LARGOS QUE UNA VIDA HUMANA, el manto de la Tierra evidencia la rigidez del acero. Considerado desde una perspectiva de miles, de millones de años, se comporta como un fluido muy viscoso, que transfiere calor desde el interior a la superficie. Los detalles de ese movimiento están por determinar, pero el modelo computarizado que se representa en esta ilustración indica la existencia de penachos de roca caliente, que se elevan desde el fondo del manto, y el hundimiento del material más frío hacia el núcleo caliente de hierro líquido (*en rojo*). La revolución de la tectónica de placas, operada a finales de los años sesenta, puso de manifiesto que la superficie de la Tierra se mueve en respuesta a las corrientes de convección del manto. Tal y como exponen los autores, John Perry, que fuera asistente de Lord Kelvin, propuso en 1895 que ese mismo fenómeno explicaba la diferencia entre la estimación de la edad de la Tierra por Kelvin y la de los geólogos.

IMAGEN CORTESIA DE SHUO WANG, UNIVERSIDAD DE MINNESOTA/*American Scientist*

el interior de un sólido obedecen la ecuación de conducción del calor, por la cual el cambio de temperatura en un punto es proporcional a la segunda derivada espacial de la temperatura (la curvatura de la línea en una gráfica temperatura-distancia), siendo la constante de proporcionalidad una propiedad del material, su conductividad térmica.

La característica principal de las soluciones de la ecuación de conducción térmica es que el tiempo que el calor necesita para recorrer una distancia dada es proporcional al cuadrado de dicha distancia dividido por la conductividad térmica. Así, pasados cinco minutos desde que se puso el pavo en el congelador, tan sólo una estrecha capa de carne, de un centímetro de grosor, habrá notado el efecto del frío circundante. El resto estará todavía a la temperatura del horno. Sin embargo, aunque sólo se requieren cinco minutos para eliminar el calor del primer centímetro de pavo, se necesitarán 20 minutos para evacuar el calor de los dos centímetros más superficiales. (En este principio físico tan sencillo se basa un consejo que

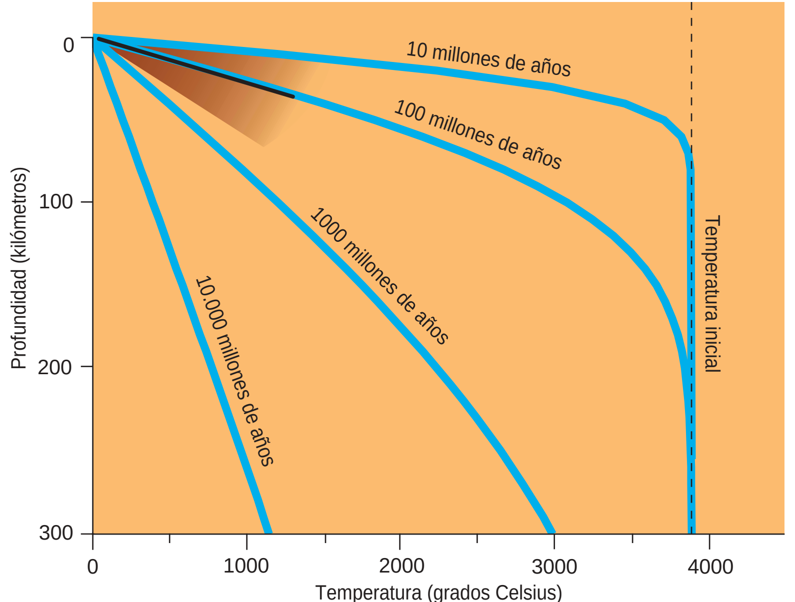
dan muchos libros de cocina: hay que sacar el pavo del horno como mínimo una hora antes de servirlo; de esta forma, el interior seguirá haciéndose sin que la parte exterior se seque.)

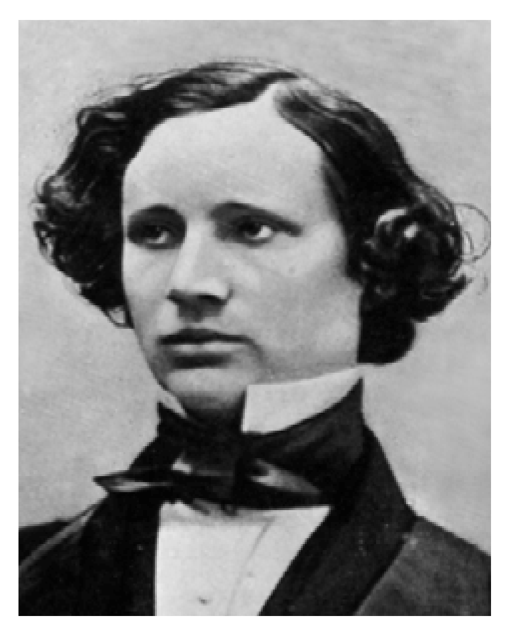
Con el propósito de aplicar datos concretos en nuestro experimento mental, consideremos que la diferencia de temperaturas entre el interior del horno y el interior del congelador es de unos 200 grados: una temperatura de 180 grados es buena para asar pavos, 20 grados bajo cero lo son para almacenar helados. Cinco minutos después de empezar el experimento, el centímetro de carne más superficial se habrá enfriado y el gradiente de temperatura será de 20 grados por milímetro de profundidad. Tras veinte minutos, los dos centímetros más superficiales se habrán enfriado, y el gradiente será de 10 grados por milímetro. Otra forma de expresar esta relación consiste en declarar que el gradiente térmico es proporcional a la raíz cuadrada del tiempo transcurrido desde que se introdujo el pavo en el congelador.

Kelvin invirtió el cálculo de la conducción del calor de Fourier: obtuvo la edad de la Tierra a partir del gradiente geotérmico en su superficie. Siguiendo con la analogía, si observáramos que un pavo había aparecido misteriosamente en nuestro frigorífico, podríamos determinar cuánto tiempo llevaba allí, si midiéramos el gradiente de temperatura en su superficie. Por ejemplo, un gradiente de temperaturas de 5 grados por milímetro implicaría una “edad” de 80 minutos. (En este caso, podemos establecer un paralelismo que resultará familiar a los aficionados a las novelas policíacas: la medición de la temperatura de un cadáver para determinar el momento de la muerte.)

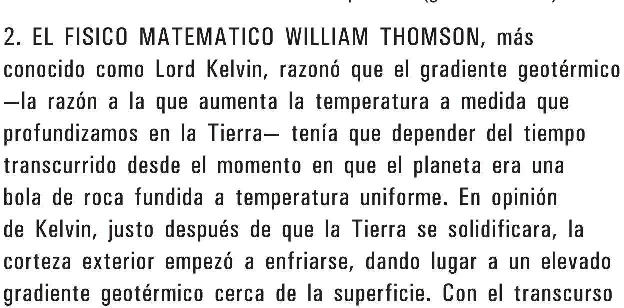
Kelvin elaboró estos razonamientos entre 1844 y 1846, cuando no existían mediciones fiables del gradiente geotérmico. Al retomar el asunto, quince años después, ya se habían medido los gradientes geotérmicos en varias partes del globo. Kelvin citaba incrementos de temperatura de entre 1/110 y 1/15 de grado Fahrenheit por pie de profundidad. Al hacer sus cálculos, utilizó un gradiente promedio de 1/50 de grado Fahrenheit por pie (unos 36 grados centígrados por kilómetro). Estableció la temperatura inicial de la Tierra (7000 grados Fahrenheit, o 3900 grados centígrados) a partir de experimentos sobre fusión de rocas; de mediciones de laboratorio dedujo la conductividad térmica de los materiales presentes en el manto. Al introducir estos datos en sus cálculos, Kelvin obtuvo una edad de entre 24 y 400 millones de años para la Tierra; ese margen se debía a la incertidumbre del valor del gradiente geotérmico y de la conductividad térmica.

Los científicos creen mucho más en una conclusión si pueden obtenerla por varias vías. Kelvin no fue excepción y calculó la edad del Sol. Según lo que se sabía en aquel momento, la única fuente de energía de la radiación solar era interna, la energía gravitatoria desprendida mientras la acreción de materia lo formaba. Kelvin calculó la cantidad disponible de este tipo de energía y extrajo la conclusión de que el Sol podía sostener el ritmo de emisión un máximo de 100 millones de años. La concordancia de este dato con la edad de la Tierra, que había obtenido

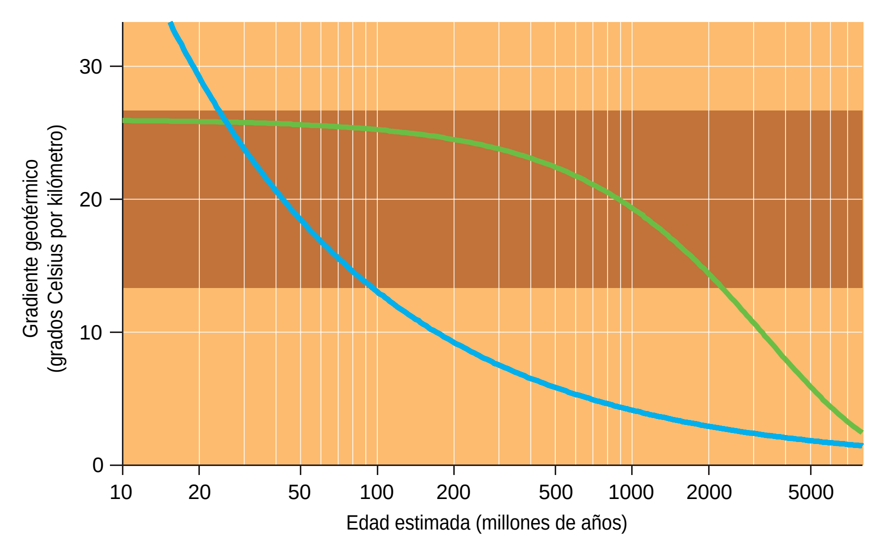




FOTOGRAFIA DE LA BIBLIOTECA BURNDY, CORTESIA DE AIP EMILIO SEGRE VISUAL ARCHIVES; DAVE SCHNEIDER Y BARBARA AULICINO (*gráfica*)/*American Scientist*



2. EL FISICO MATEMATICO WILLIAM THOMSON, más conocido como Lord Kelvin, razonó que el gradiente geotérmico —la razón a la que aumenta la temperatura a medida que profundizamos en la Tierra— tenía que depender del tiempo transcurrido desde el momento en que el planeta era una bola de roca fundida a temperatura uniforme. En opinión de Kelvin, justo después de que la Tierra se solidificara, la corteza exterior empezó a enfriarse, dando lugar a un elevado gradiente geotérmico cerca de la superficie. Con el transcurso del tiempo, el calor se fue difundiendo hacia el exterior y, por tanto, el gradiente disminuyó gradualmente (*véase el gráfico*). De acuerdo con el modelo de Kelvin, podemos determinar la edad de la Tierra mediante las mediciones del gradiente geotérmico cerca de la superficie (*la cuña marrón*). Kelvin calculó inicialmente que el gradiente geotérmico medio (*la línea negra en el interior de la cuña*) correspondía a una edad cercana a los 100 millones de años. Más tarde redujo su estimación a unos 20 millones de años.





3. JOHN PERRY, CATEDRATICO DE INGENIERIA y antiguo ayudante de Kelvin, concilió las mediciones del gradiente geotérmico con una edad de la Tierra de miles de millones de años; partía del supuesto de que el planeta contenía un manto fluido y convectivo, cubierto por una capa de roca sólida mucho más delgada. Cálculos efectuados con el modelo de Perry para una corteza de 50 kilómetros de espesor, junto con estimaciones modernas de la conductividad térmica y el punto de solidificación del manto rocoso, muestran que el rango de estimaciones para el gradiente geotérmico medio (*la banda marrón*) es compatible con edades de hasta 2000 y 3000 millones de años (*línea verde*). Con el modelo de conductividad lineal uniforme de Kelvin, el gradiente geotérmico sólo es compatible con edades de entre 20 y 100 millones de años (*línea azul*).

FOTOGRAFIA DE SCIENCE AND SOCIETY PICTURE LIBRARY, SCIENCE MUSEUM PICTORIAL; BARBARA AULICINO (*gráfica*)/*American Scientist*

de forma independiente, fortaleció sin duda su confianza en el resultado. Redujo más tarde esa estimación a 20 millones de años. Nunca renunció a su convicción de que la edad de la Tierra era, como mucho, de unas decenas o unos pocos centenares de millones de años.

Hoy se sabe que la edad de la Tierra es de aproximadamente 4500 millones de años. ¿En qué se equivocó Kelvin? ¿Utilizó valores erróneos para el gradiente térmico, para la conductividad térmica de las rocas o para la temperatura inicial de la Tierra? No, ésos no fueron sus errores. Si utilizáramos las mediciones contemporáneas más precisas de estos parámetros, la repetición del cálculo de Kelvin daría aún una edad de entre 24 y 96 millones de años.

Antes de analizar minuciosamente los razonamientos de Kelvin, vale la pena describir la cosmovisión que pretendía rebatir. Los geólogos de principios del siglo XIX aceptaban mayoritariamente la doctrina de una Tierra de edad ilimitada. Según un aforismo de James Hutton, célebre geólogo escocés del siglo XVIII, el registro geológico no mostraba “vestigios de un comienzo, ni indicios de un final”. Esta doctrina permitía a los geólogos explicar cualquier fenómeno no tanto por las leyes de la física, como por lo que el geólogo norteamericano Thomas Chrowter Chamberlin denominó en 1899 “cheques en blanco del banco del tiempo”. Para Kelvin, este juego sin reglas era acientífico. Es más, lo prohibían las leyes de la termodinámica, en cuyo desarrollo había desempeñado un papel destacado.

En 1867 tuvo una reveladora conversación con el geólogo escocés Andrew Ramsay, tras una conferencia sobre la historia geológica de Escocia. En palabras de Kelvin:

> Pregunté a Ramsay cuánto tiempo le atribuía a esa historia. Respondió que no podía ponerle un límite. Le dije: “¿Supone usted que la historia geológica ha transcurrido durante mil millones de años?” “Por supuesto.” “¿Diez mil millones de años?” “Sí.” “El Sol es un cuerpo finito. Usted puede decirme cuántas toneladas pesa. ¿Piensa usted que ha estado brillando durante un billón de años?” “Soy tan incapaz de estimar y entender las razones que ustedes los físicos tienen para limitar el tiempo geológico como usted es incapaz de entender las razones geológicas de nuestras ilimitadas estimaciones.” Le contesté: “Usted entendería perfectamente el razonamiento de los físicos si le prestase atención”.

Es fácil pasar por alto los enormes beneficios que reportó a la geología el mero hecho de tener que combatir con Kelvin por la edad de la Tierra. A finales del siglo XIX, la doctrina de una Tierra estacionaria, de edad infinita, había dado paso a una visión más depurada. Los geólogos habían aceptado que la edad de la Tierra era finita y que evaluarla mediante un razonamiento cuantitativo constituía parte esencial de la geología. Sin embargo, lo que nadie hizo hasta 1895 fue prestar atención al razonamiento de Kelvin, como él mismo pedía.

Todos los razonamientos de Kelvin sobre la edad de la Tierra se basan en un principio sencillo: la energía se conserva. En sus análisis, Kelvin añadió tres supuestos. De ellos, sólo dos se aplicaban en sus argumentos sobre la edad de la Tierra: que el planeta es rígido y que sus propiedades físicas son homogéneas. El tercer supuesto —no existe ninguna fuente de energía desconocida— se aplicaba tanto a la Tierra como al Sol. Ahora sabemos que esta tercera presunción explica el error de Kelvin acerca de la edad del Sol. La energía radiada por el Sol tiene su origen en la fusión de núcleos de hidrógeno

para formar helio en su interior, si bien la demostración cuantitativa de este mecanismo tuvo que esperar a la detección de los “neutrinos perdidos”, en 2001.

La historia ortodoxa del debate sobre la edad de la Tierra afirma que el tercer supuesto de Kelvin socavó su cálculo de la edad de la Tierra. No obstante, aunque la desintegración de los elementos radiactivos en el interior de la Tierra proporciona una fuente de calor de larga duración, el desconocimiento de la misma no fue responsable de la incorrecta estimación de Kelvin de la edad de la Tierra. El verdadero error de su razonamiento fue señalado por John Perry, uno de sus antiguos ayudantes, casi una década antes de que la radiactividad fuera reconocida como fuente de calor.

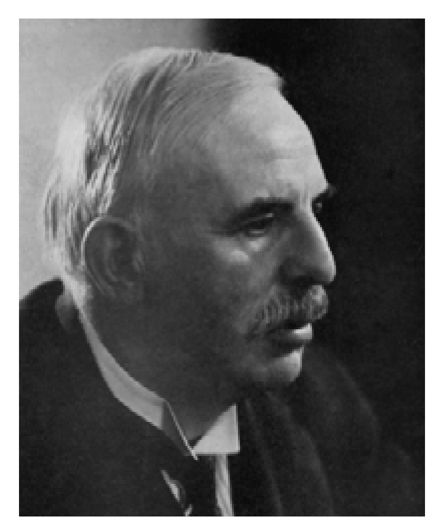
Perry, originario de Irlanda del Norte, cursó sus estudios en la Universidad de Belfast, donde tuvo como profesor de ingeniería a James Thompson, hermano de Kelvin, que también fue un científico destacado. Tras licenciarse, dio clases en una escuela de formación profesional durante cuatro años antes de convertirse en ayudante de Kelvin en Glasgow. Perry recordaría a Kelvin con afecto y respeto durante toda su vida. Debió de contar no poco en ello el cambio radical en su carrera que le debía. Al cabo de un año, el profesor de formación profesional se convirtió en profesor de ingeniería en Tokio, donde contribuyó enormemente al nacimiento de la industria japonesa, para luego ocupar una cátedra en Londres.

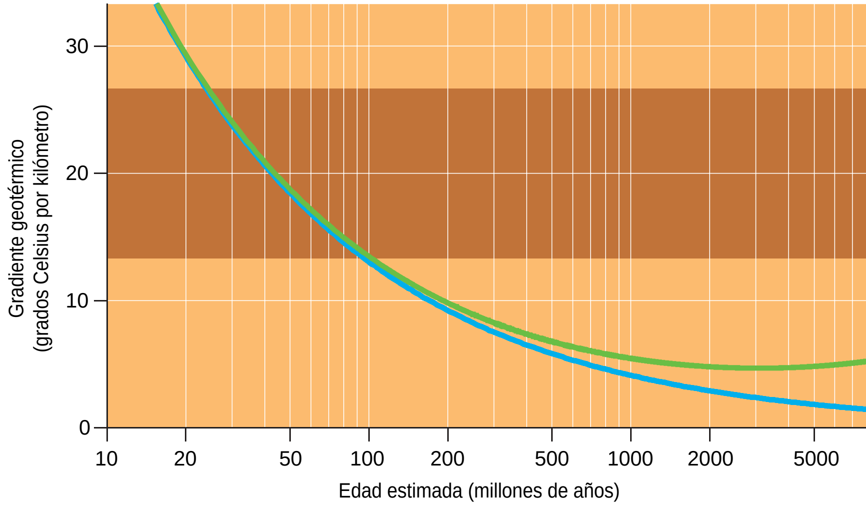
Tanto en Tokio como en Londres, fue un incansable docente de ingeniería y matemáticas. Insistía en que las matemáticas debían presentarse a los científicos con claridad y atenida a la realidad concreta. Influiría en generaciones de escolares, sin que lo supiesen: reconoció el poder del papel milimetrado para el trazado de funciones y datos y, al reducir su coste de producción, logró que fuera de uso habitual. Acabó su carrera ocupando la cátedra James Hutton de ingeniería en el Real Colegio de Ciencias (actualmente Colegio Imperial de Londres).

Perry descubrió el punto débil del razonamiento de Kelvin en 1894. Mas, reacio a incomodar a su protector, intentó primero convencer a Kelvin cara a cara o por vía epistolar. Kelvin no le hizo ningún caso, ya sea porque no entendió a Perry o porque no le interesaba. En consecuencia, Perry decidió hacer público su argumento en 1895. Escribió en *Nature*: “Algunos amigos interesados en geología me han pedido que criticara el cálculo de Lord Kelvin sobre la edad probable de la Tierra. A menudo les he respondido que es imposible que Lord Kelvin haya cometido un error en el cálculo”. En lugar de centrarse en los cálculos matemáticos de Kelvin, Perry sugirió que se examinaran sus premisas.

En el modelo de Kelvin, el gradiente térmico cerca de la superficie de la Tierra (o, en el experimento mental expuesto más arriba, del pavo) desciende a medida que la capa exterior enfriada va adquiriendo un grosor creciente. Si la Tierra fuera mucho más antigua que 100 millones de años, la capa sería tan gruesa, que el gradiente térmico sería mucho menor del observado. Perry se dio cuenta de que hay una manera sencilla de detener el ensanchamiento de la capa: que el calor se transfiriera con mucha mayor eficiencia en el interior de la Tierra que en su superficie. Si fuera así, el interior profundo proporcionaría una gran reserva de calor, que mantendría alto el gradiente de temperatura de la superficie durante largo tiempo. En consecuencia, la estimación de Kelvin de la edad de la Tierra sería demasiado baja, quizás en varios órdenes de magnitud.

Perry tenía varias hipótesis sobre cómo podría ocurrir ese fenómeno. Para nuestros propósitos, su argumento más importante es el de que la convección del interior fluido o semifluido de la Tierra podía transferir calor de forma mucho más eficiente que la conducción. Señaló que, si en el planeta tan sólo la capa exterior es sólida, y el resto es un fluido convectivo, el interior estará mezclado y a temperatura constante. El modelo de Perry reemplaza el pavo de nuestro experimento mental por una botella





4. EN UN ENCUENTRO CELEBRADO EN 1904 en la Real Institución, el físico Ernest Rutherford insinuó que las estimaciones de Kelvin sobre la edad de la Tierra eran demasiado bajas, porque cuando las formuló no conocía aún el calentamiento radiactivo, descubierto años después. Sin embargo, nuestros conocimientos de la cantidad de calentamiento radiactivo en el manto sólo modifican la predicción del modelo de Kelvin (*línea azul*) muy ligeramente (*línea verde*). Edades superiores a 100 millones de años siguen siendo incompatibles con los gradientes térmicos medidos (*banda marrón*).

FOTOGRAFIA REALIZADA POR RAMSAY Y MUSPRATT, CORTESIA DE AIP EMILIO SEGRE VISUAL ARCHIVES, BRITTLE BOOKS COLLECTION; BARBARA AULICINO (*gráfica*)/*American Scientist*

del mismo tamaño, llena, digamos, de sidra caliente. En este objeto, tan sólo son sólidos unos pocos milímetros de la parte más exterior (el cristal de la botella), mientras que el interior se agita por convección. Por ello, el gradiente de temperatura en la superficie puede mantenerse durante largo tiempo.

El cálculo de Perry muestra que, si la Tierra presenta una capa conductora de unos 50 kilómetros de espesor, con un fluido perfectamente convectivo por debajo, los gradientes térmicos medidos en la superficie concuerdan con una edad de hasta 2000 o 3000 millones de años. Perry comprendía que la eficiencia de la transferencia de calor en el manto no podía ser perfecta. Por consiguiente, modelizó el interior profundo como un sólido de alta "semidifusividad". Sus resultados coincidieron con el cálculo sencillo: la Tierra podía tener varios miles de millones de años. Los cálculos completos de la convección del manto (imposibles hasta que se dispuso de ordenadores) confirman que el razonamiento de Perry era correcto.

En otras palabras, Perry reconcilió un cálculo físico de la evolución térmica de la Tierra con la edad dilatada que requerían los geólogos. Perry hubo de limitarse a tomar en cuenta que el calor se transmitía en el interior profundo de la Tierra con mayor facilidad que en las capas exteriores. Sin embargo, todavía hoy la mayoría de los geólogos creen que el error, el "comprensible" error, de Kelvin estribó en no conocer la radiactividad interna de la Tierra.

La pista falsa de la radiactividad

En 1903, Pierre Curie y su asistente Albert Laborde demostraron que el recién descubierto proceso de la desintegración radiactiva producía calor. Al poco tiempo, se argumentó que la magnitud de esa fuente bastaba para invalidar la conclusión de Kelvin acerca de la edad de la Tierra. Ernest Rutherford, considerado el padre de la teoría nuclear, lo mencionó en un encuentro de la Institución Real, en 1904:

> Llegué a la sala, que estaba medio a oscuras. Al entrar me di cuenta de que Lord Kelvin se encontraba entre el público. Pensé que tendría problemas en la última parte de mi conferencia, que trataba de la edad de la Tierra, porque mi punto de vista entraba en conflicto con el suyo. Para mi alivio, Kelvin se durmió pronto, pero cuando llegué al punto importante, vi que el viejo pájaro se enderezaba, abría un ojo y ¡me dirigía una mirada siniestra! Entonces me llegó la inspiración y dije que Lord Kelvin había puesto límite a la edad de la Tierra, *siempre que no se descubriera una nueva fuente de calor*. Esa aseveración profética se refiere a lo que estamos considerando esta noche, ¡el radio! El viejo, ¡hay que ver!, me sonreía de oreja a oreja.

Es posible que la fama de esta anécdota explique la creencia habitual de que el descubrimiento del calor de origen radiactivo socavó tanto el supuesto básico del cálculo de Kelvin como sus conclusiones. Sin embargo, se trata de una afirmación que es lógicamente incorrecta. La conclusión de Kelvin sólo habría sido invalidada por el descubrimiento del calor radiactivo si la incorporación de dicho calor en el cálculo hubiera producido una edad de la Tierra muy distinta.

La estimación actual para la tasa global de generación de calor radiactivo en el interior de la Tierra es de unos $2 \cdot 10^{13}$ watt, equivalente a cerca de la mitad de la cantidad total de calor que escapa actualmente de la Tierra. Podría parecer, por tanto, que la producción de calor del interior de la Tierra contribuye apreciablemente a los gradientes de temperatura de la superficie. Sin embargo, debemos recordar que esta producción de calor se reparte por el volumen total del manto, de 2900 kilómetros de espesor, y que la ecuación de Kelvin muestra que en 100 millones de años la conducción sólo puede extraer calor de los 100 kilómetros más externos de la Tierra. Por tanto, cabe esperar que si se reprodujera el cálculo de Kelvin incluyendo la radiactividad, sólo contribuiría al gradiente de temperaturas en la superficie el calor generado en los 100 kilómetros más exteriores de le Tierra (cerca del 5 % del volumen del manto).

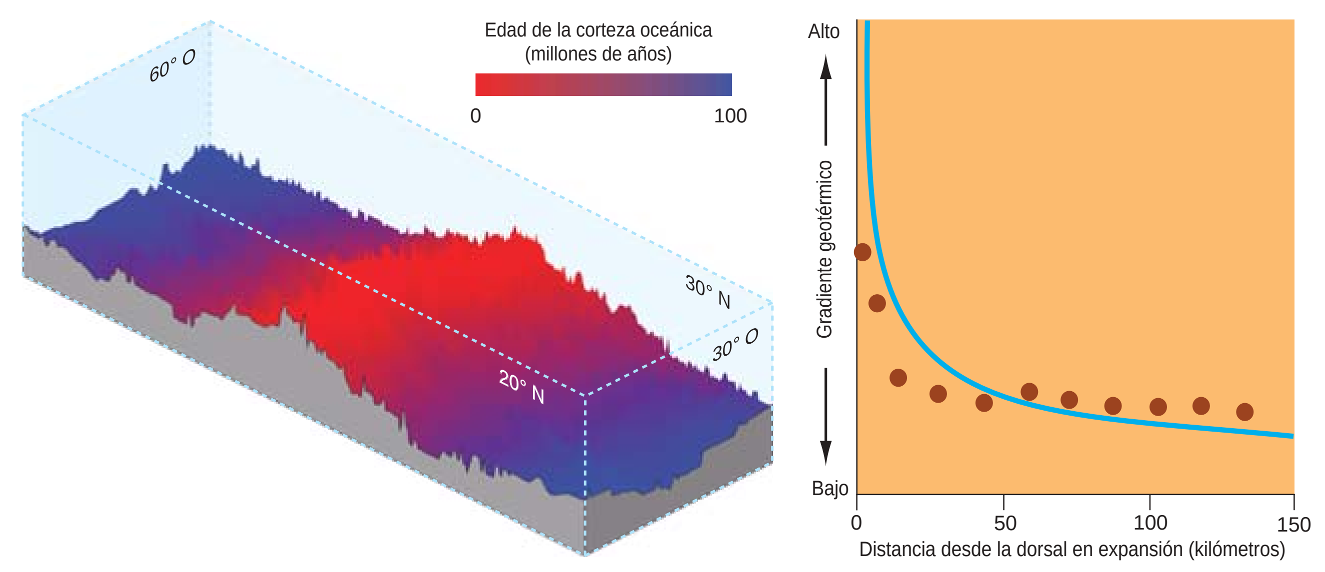
Ni siquiera en el caso de que Kelvin hubiera incluido el calor radiactivo en el cálculo, su estimación de la edad de la Tierra habría cambiado. Un cálculo minucioso que tiene en cuenta los detalles de la distribución del calor radiactivo confirma este sencillo razonamiento.

Perry: una visión profética del manto

El análisis de la edad de la Tierra que efectuó Perry seguía la senda de Kelvin en la medida en que tomaba por modelo un sistema físico simple. Pero el sistema escogido difería del analizado por Kelvin. Por aquel entonces se solía admitir que la existencia de un manto fluido era una condición necesaria para la isostasia, hipótesis elaborada a principios del siglo XIX según la cual los elementos de la corteza terrestre —las cadenas montañosas, por ejemplo— flotaban en un manto más denso, a la manera en que los icebergs flotan en el agua. Sin embargo, Kelvin creía que había firmes razones para rechazar la fluidez del interior. Sabía, por su estudio de las mareas terrestres, que los 1500 kilómetros más exteriores del manto, mostraban la rigidez del acero, por lo menos. Perry puso particular empeño en cambiar las ideas de su viejo maestro. Para ello se valió de un lenguaje dirigido específicamente a la forma de pensar de Kelvin:

> ...la base real de su cálculo es la hipótesis de que una Tierra sólida no puede cambiar de configuración... ni siquiera en 1000 millones de años, por la acción de fuerzas que tiendan sin cesar a alterarla. Sin embargo, observamos el cierre gradual de túneles en las minas y sabemos que no dejan de producirse pliegues y fallas y otros cambios de la morfología de la Tierra sólida por efecto de fuerzas de larga duración. Ya sé que la roca sólida no es lo mismo que la cera, ¡pero 10^9 años es mucho tiempo y las fuerzas son enormes!

La referencia de Perry a la cera era deliberada y merece una explicación. Kelvin, como muchos físicos de su tiempo, creía que la luz no podía viajar en el vacío, sino que requería de un medio físico —el "éter"— para propagarse. Este medio debía poseer propiedades elásticas en escalas de tiempo muy cortas, para que las ondas de luz se propagaran, pero a



5. LOS GEOLOGOS DESPRECIAN EL INTENTO DE KELVIN de calcular la edad de la Tierra por simplista, pero el modelo utilizado por Kelvin —el de un semiespacio en enfriamiento— ha demostrado ser muy útil en geología. En particular, explica bien las características globales de las placas oceánicas a medida que se desplazan desde las dorsales oceánicas, donde tienen su origen. Una sección de la corteza del Atlántico norte (*izquierda*) ilustra la configuración general. En ella se observa un océano no muy profundo sobre la roca joven y caliente de la dorsal (*rojo*). El piso oceánico más antiguo a cada lado (*azul*) ha tenido tiempo de enfriarse y contraerse; en consecuencia, se hunde. Los cambios respecto del modelo del semiespacio en enfriamiento, como la tendencia de los gradientes geotérmicos (puntos sólidos del gráfico) a adoptar valores menores que los que predice el modelo (*línea azul*), sirven para revelar otros fenómenos, como la circulación de agua de mar a través de la nueva corteza oceánica.

DAVE SCHNEIDER Y BARBARA AULICINO (*gráficos*), ADAPTADO DE SCLATER ET AL. 1980/*American Scientist*

escalas de tiempo largas tenía que ser débil, para que la Tierra se moviese libremente en su seno.

Aunque no pudo encontrar una formulación matemática satisfactoria para el éter, Kelvin se sentía orgulloso de una demostración física que ilustraba las propiedades físicas requeridas. Introdujo agua en un cilindro de cristal, colocó pequeños tapones de corcho en su superficie, los cubrió con una capa de cera de zapatero escocesa y, por último, colocó balas por encima. En una observación a corto plazo, no parecía suceder nada visible, pero tras seis meses observó que los tapones de corcho y las balas se habían empotrado en la cera. Al cabo de un año, los tapones de corcho aparecieron arriba y las balas en el fondo. La cera muestra resistencia en períodos cortos, pero es frágil en escalas de tiempo largas.

Desde un punto de visto cualitativo, estas propiedades eran exactamente las que debía tener el éter, según Kelvin. Al mencionar la cera, Perry estaba sugiriendo que el desacuerdo entre Kelvin y los geólogos se resolvería si se aceptase que un manto de la Tierra rígido en escalas de tiempo cortas, aunque fluido en escalas de tiempo largas. Kelvin no captó la idea. Ni tampoco nadie, al parecer.

Perry publicó sus razonamientos en las páginas de *Nature*, órgano científico tan importante en 1895 como hoy. Otros científicos interesados por el debate sobre la edad de la Tierra sabían que Perry había desafiado las conclusiones de Kelvin. ¿Por qué no se aceptó, pues, la conjetura de Perry —sobre la existencia de convección en el interior de la Tierra—, ni en la década anterior a que se descubriera el calor radiactivo, ni después siquiera?

Debieron de pesar los factores personales. La mayoría de los científicos actuales, si hubiesen estado tan convencidos como Perry de una postura determinada en un debate tan importante, habrían insistido más. Pero Perry reverenciaba a Kelvin y, pese a la firmeza de su creencia en que debía presentarse un razonamiento físico alternativo, no era dado a las disputas egotistas. Al parecer, no continuó trabajando sobre el tema, sino que pasó otros veinticinco años investigando e impartiendo clases sobre un amplio abanico de asuntos, hasta su muerte por escorbuto durante un largo viaje por mar, emprendido justamente por razones de salud.

Perry no fue el único en sucumbir al principio de autoridad de una forma insólita para los criterios actuales. Es posible que una similar atmósfera de respeto condujese a que el planteamiento de Kelvin fuera sustituido por el de Rutherford, desde 1904.

El olvido al que se relegó el razonamiento de Perry podría atribuirse al hecho de que la mayoría de los que se interesaban por la edad de la Tierra no lo entendió. Los biólogos se aferraban a la conclusión de Perry de que la estimación de Kelvin podía estar equivocada, pero al mismo tiempo admitían que se les escapaba su razonamiento. Los geólogos se contentaron con aceptar la demostración de que Kelvin estaba equivocado como prueba de que la intuición geológica triunfa sobre los análisis físicos sencillos cuando se trata de la Tierra "real". (No debemos olvidar, sin embargo, que los geólogos de aquel tiempo producían estimaciones de la edad de la Tierra tan equivocadas como las de Kelvin, o más.)

A muchos geólogos les parecía, como se desprende de la agria conversación entre Andrew Ramsay y Kelvin, que los físicos eran incapaces de entender el razonamiento

geológico y que la geología era demasiado compleja para encapsularla en un modelo matemático. El análisis de Perry muestra, sin embargo, que el error de Kelvin no residía en el uso de una física sencilla, sino en el uso de una física, aunque sencilla, equivocada.

Kelvin y Perry sabían que los modelos sencillos —el propósito de los cuales es permitir el análisis de características importantes de un fenómeno, no reproducir ciegamente todos sus detalles— son herramientas indispensables en la ciencia. Un famoso principio de Einstein está en la base de muchos de los modelos más útiles: "Se debe hacer todo tan sencillo como sea posible, pero no más sencillo".

Merece la pena ilustrar el poder explicativo de los modelos sencillos en geología con un ejemplo contemporáneo. Supongamos que quisiéramos explicar la evolución térmica del lecho oceánico. Un modelo que diera cuenta con precisión de características importantes y obvias (las diferentes propiedades térmicas y los distintos espesores de las capas geológicas, la circulación de agua impulsada por el calor a través de las porciones menos profundas de la roca, el vulcanismo del suelo oceánico, etc.) debería tener por lo menos una docena de parámetros, muchos de ellos escasamente conocidos; requeriría millones de cálculos tan sólo para explorar las diversas posibilidades. El resultado sería inabarcable.

En contraste, si tratamos el lecho oceánico como una losa homogénea de material rocoso, obtenemos la solución analíticamente sencilla de Kelvin para un "semiespacio" en enfriamiento, que comprende las principales características de las placas oceánicas a medida que se alejan de las dorsales oceánicas donde se forman. Si incluimos la contracción térmica que se produce con el enfriamiento gradual de la losa, el modelo en cuestión explica adecuadamente las mediciones de la profundidad de la mayor parte del suelo oceánico.

Kelvin no tuvo en cuenta que, en diverso grado, todos los modelos sencillos están condenados al fracaso, ni que se aprende tanto de los aciertos como de los fallos. El modelo del semiespacio en enfriamiento no funciona en el lecho oceánico joven porque se transporta también calor a través de las dorsales a causa de la circulación de agua caliente. No obstante, la diferencia entre los gradientes térmicos teóricos y observados permite deducir la cantidad de calor transferida por esa circulación y, por tanto, el flujo de agua a través de las dorsales. El modelo fracasa, además, cuando el suelo oceánico tiene más de unos 80 o 90 millones de años, pero con ese fracaso se descubre una segunda escala de convección en el manto y permite evaluar el espesor de las placas tectónicas.

De forma similar, el análisis de Perry mostró que el fracaso del modelo conductivo de la Tierra quedaba explicado por la existencia de convección en el manto. Si en su momento se hubiera tenido en cuenta el mensaje de Perry, las primeras edades radiométricas habrían confirmado la explicación convectiva del gradiente geotérmico observado en la Tierra. Aceptar que existe convección en el interior aparentemente sólido de la Tierra habría hecho difícil sostener la visión "fijista" de la Tierra, que afirmaba la imposibilidad física de que los continentes se muevan de forma horizontal.

El fijismo frenó el progreso de la geología en la primera mitad del siglo XX. Los partidarios de la deriva continental, ante tanto escepticismo, tuvieron que argumentar sin descanso que la Tierra sólida podría comportarse a largo plazo como un fluido. La deriva continental sólo se aceptaría en los años sesenta del pasado siglo.

Nos quedamos con la cuestión de por qué tantos científicos (incluidos los geólogos profesionales) siguen creyendo que el descubrimiento de la radiactividad demostró que Kelvin estaba equivocado y enseñó por qué lo estaba. Es posible que parte de la respuesta consista en que se trataba de una buena historia. Arthur Eve, uno de los primeros biógrafos de Rutherford, comentó que éste acostumbraba repetir la anécdota de la salida que había tenido frente al "viejo pájaro" Kelvin. Es muy posible que la simpatía de la anécdota, y la eminencia de su autor, llevara a la aceptación irreflexiva del mito. Resulta difícil evitar que los viejos científicos, cuando recurren a su anecdotario, dejen de repetir historias que encuentran divertidas. Sin embargo, sus jóvenes colegas deberían cuidarse de no confundir esos chascarrillos con la historia genuina.

Los autores

Philip C. England se doctoró en geofísica por la Universidad de Oxford en 1976. Investigó e impartió clases en Cambridge y Harvard hasta su traslado a Oxford en 1986. En la actualidad, es catedrático del departamento de geología de esta universidad. La mayor parte de su trabajo trata de la deformación de los continente tanto en sus aspectos teóricos como observacionales. **Peter Molnar** obtuvo un doctorado en sismología por la Universidad de Columbia en 1970. Su carrera docente e investigadora se ha desarrollado en la Institución Scripps de Oceanografía, el MIT y Oxford. Desde 2001 es miembro del departamento de ciencias geológicas de la Universidad de Colorado en Boulder. Se centra en las interacciones entre geodinámica, geomorfología y cambio climático a largo plazo. **Frank M. Richter** se doctoró en 1972 por la Universidad de Chicago y ocupa actualmente la cátedra Sewel L. Avery en el departamento de ciencias geofísicas de dicha universidad.

Bibliografía complementaria

KELVIN AND THE AGE OF THE EARTH. F. M. Richter en *Journal of Geology*, vol. 94, págs. 395-401; 1986.

KELVIN'S AGE OF THE EARTH PARADOX REVISITED. F. D. Stacey en *Journal of Geophysical Research*, vol. 105, págs. 13.155-13.158; 2000.

"HAD LORD KELVIN A RIGHT?": JOHN PERRY, NATURAL SELECTION AND THE AGE OF THE EARTH, 1894-1895. B. Shipley en *In The Age of the Earth: from 4004 BC to AD 2002*, dirigido por C. L. E. Lewis y S. J. Knell. The Geological Society; Londres, 2001.

DEGREES KELVIN. D. Lindley. Joseph Henry Press; Washington, D.C., 2004.

JOHN PERRY'S NEGLECTED CRITIQUE OF KELVIN'S AGE FOR THE EARTH: A MISSED OPPORTUNITY IN GEODYNAMICS. P. C. England, P. Molnar y F. M. Richter en *GSA Today*, vol. 17, n.º 1, págs. 4-9; 2007.

TALLER Y LABORATORIO

Marc Boada Ferrer

El telescopio reflector de Newton

Transcurridas varias semanas desde la inauguración del Gran Telescopio de Canarias (Grantecan), parece oportuno recordar en esta sección su remoto antecesor, el telescopio reflector que Newton presentó ante la Sociedad Regia londinense en 1672. Hazaña óptica que le abrió las puertas de la selecta institución, que luego presidiría.

Isaac Newton (1642-1727) tuvo que superar notables dificultades técnicas para construir un novedoso telescopio que resolvería las deficiencias de los aparatos contemporáneos. Los telescopios de su tiempo utilizaban objetivos refractores y lentes convexas, que al focalizar la imagen en un plano producían aberraciones cromáticas y geométricas.

Los ópticos de la época limitaban en lo posible tales distorsiones mediante la reducción de la curvatura de las lentes y el consiguiente aumento de la distancia focal. Lo que obligaba a incrementar la longitud del telescopio y dificultaba su manejo. Varios autores plantearon una alternativa: la sustitución de esas lentes por sistemas ópticos basados en espejos cóncavos, que concentraban la luz en un foco sin causar ninguna aberración. Esa posibilidad ya se conocía en la antigüedad clásica, pensemos en los célebres espejos ustorios de Arquímedes, pero su construcción entrañaba numerosos problemas técnicos.

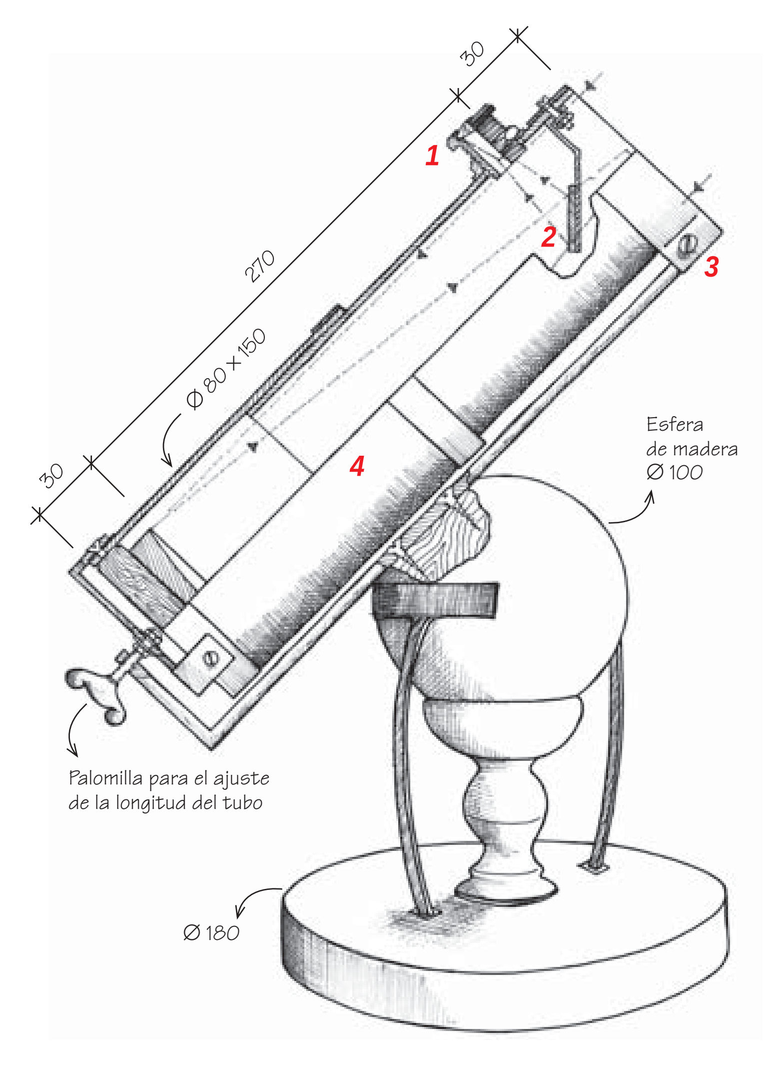
Hacia 1663, James Gregory (1638-1675) se propuso construir un reflector. Ese tipo de telescopio presenta un inconveniente: si intentamos colocar un ocular en el foco (el punto donde se reúnen los rayos luminosos reflejados en el espejo cóncavo del objetivo) y mirar, nuestra cabeza tapará la luz que llega al objetivo. Para resolver ese problema, Gregory agregó un espejo secundario, que devolvía la luz hacia el espejo principal. La luz atravesaba entonces el objetivo, vía un orificio abierto en su centro, y arribaba al ocular. Al situar el ocular detrás del objetivo, la cabeza del observador ya no hacía "sombra".

Newton optó por una solución distinta. Colocó cerca del foco del espejo primario un espejo secundario (o un prisma) inclinado 45º que enviaba la imagen hacia un agujero abierto situado en la pared lateral del tubo del telescopio, donde instaló el ocular de observación. El telescopio newtoniano ofrecía, entre otras ventajas, portabilidad, buena corrección cromática y luminosidad.

El telescopio de Newton consta de un número restringido de piezas. Un tubo de cartón mantiene en posiciones definidas los elementos ópticos: el espejo principal (u objetivo), el espejo secundario y el ocular. Una montura de madera, constituida por una junta esférica, permite apuntar el telescopio hacia cualquier zona de la bóveda celeste. La construcción de una réplica de este instrumento pionero nos ofrece una excelente aproximación a la óptica del siglo XVII. Por lo demás, no entraña especial dificultad para el aficionado.

Empezaremos por la construcción del objetivo. Newton utilizó *speculum metal*, un bronce conocido de antiguo, rico en estaño o, a veces, arsénico, de reflejo plateado, duro y susceptible de recibir buen pulimentado. Nosotros podemos emplear aluminio, óptimo reflector en el rango del visible. Nos proveeremos de un disco de aluminio, en alguna aleación de buena lisura (que contenga, sobre todo, cobre o zinc), de 100 mm de diámetro y 15 mm de espesor. Con el disco construiremos un espejo esférico con una distancia focal de unos 300 mm. Puesto que la distancia focal corresponde a la mitad del radio de curvatura de la superficie del espejo, tornearemos cóncava una de las caras planas del mismo, con un radio de 600 mm.

Para el vaciado del objetivo, nos dirigiremos a un taller mecánico que disponga de un torno de control numérico. Encargaremos un acabado finísimo, realizado



con un avance mínimo de la herramienta, siendo óptimo el acero al cobalto o la punta de diamante.

Una vez terminado el mecanizado, procederemos al pulimento de la superficie del objetivo. En su tratado de óptica (“Opticks: or a Treatise of the Reflections, Refractions, Inflections and Colours of Light”, 1704), Newton explica con toda precisión cómo pulió dos objetivos mediante una torta de pez fundida y un abrasivo al que denomina “masilla”, que había levigado y refinado hasta obtener la fracción más fina.

Para agilizar el proceso, nosotros recurriremos a la maquinaria eléctrica actual. Sirve un taladro dotado de un suave disco de pulido en algodón y abrasivo para acabado, en barra (una pasta de bruñido que permite llevar la superficie a una perfecta reflexión especular). Pueden adquirirse esos componentes en comercios de material para joyería; resulta idóneo el pulimento indicado para el acabado final de metales blandos, como el oro y la plata. El proceso debe conducirse con sumo cuidado.

Colocaremos el taladro en posición horizontal; lo fijaremos, mediante un soporte sólido, en un banco de trabajo. Acoplaremos el disco de pulido, lo impregnaremos con el pulimento y acercaremos despacio el objetivo presionando levemente contra el disco. El espejo debe estar en movimiento constante y procuraremos realizar un pulimento uniforme de toda la superficie.

La zona exterior del espejo suele desgastarse antes que la central; el óptico práctico habla entonces de un borde “revatido”. Una zona exterior defectuosa no enviaría la luz al mismo foco que la zona central, con la degradación consiguiente de la calidad de la imagen. De ahí que hayamos partido de un disco de 100 mm. Así, cuando esté pulido lo devolveremos al torno, donde, con cuidado y sin fluido de corte, disminuiremos su diámetro exterior hasta 60 mm, eliminando la parte perniciosa.

Por supuesto, nuestro objetivo astronómico de superficie esférica no presenta ni mucho menos una calidad óptica equiparable a la de los telescopios modernos parabólicos. Sí guarda semejanza, en cambio, con el que construyó Newton; por tanto, ofrecerá las mismas prestaciones que el diseño original.

Construido el objetivo, fabricaremos el espejo secundario. La intersección de un cono (el cono de luz reflejada en el objetivo) con un plano inclinado 45º (el espejo secundario) dibuja una elipse. El secundario deberá ser, por tanto, elíptico. Para simplificar la construcción, partiremos de una pieza rectangular, con unas dimensiones aproximadas de 15 × 21 mm (el lado largo debe ser igual al corto multiplicado por el seno del ángulo de inclinación, 45º). Daremos luego forma elíptica a su perímetro, con lo que se reducirá la sombra que proyecta sobre el objetivo (causa de distorsiones ópticas).

Para el cálculo de las dimensiones debe tenerse en cuenta que el foco no corresponde a un punto. A un telescopio de 1000 mm de distancia focal y un campo de visión de 30’ (el que permitiría observar la luna llena) le corresponde un plano focal de unos 10 mm. La distancia focal de nuestro aparato es de unos 300 mm; por tanto, la imagen en el foco tendrá un diámetro de 3 mm. Así pues, para cubrir todo el cono de luz, el espejo secundario debe adquirir las medidas que antes hemos indicado más un pequeño margen.

El espejo secundario deberá ser de vidrio aluminizado de primera superficie, es decir, con el depósito reflectante de aluminio ante el cristal. Podemos utilizar los espejos interiores de una fotocopiadora vieja, recortados con todo cuidado, para que no se rayen, a la medida conveniente. Encontramos ese tipo de espejos también en cámaras Réflex, cámaras de Super8 ya en desuso o prismáticos de bajo precio. En su defecto, como ya preconizaba Newton, podemos usar un prisma a 45º con una hipotenusa de las mismas dimensiones que el espejo secundario.

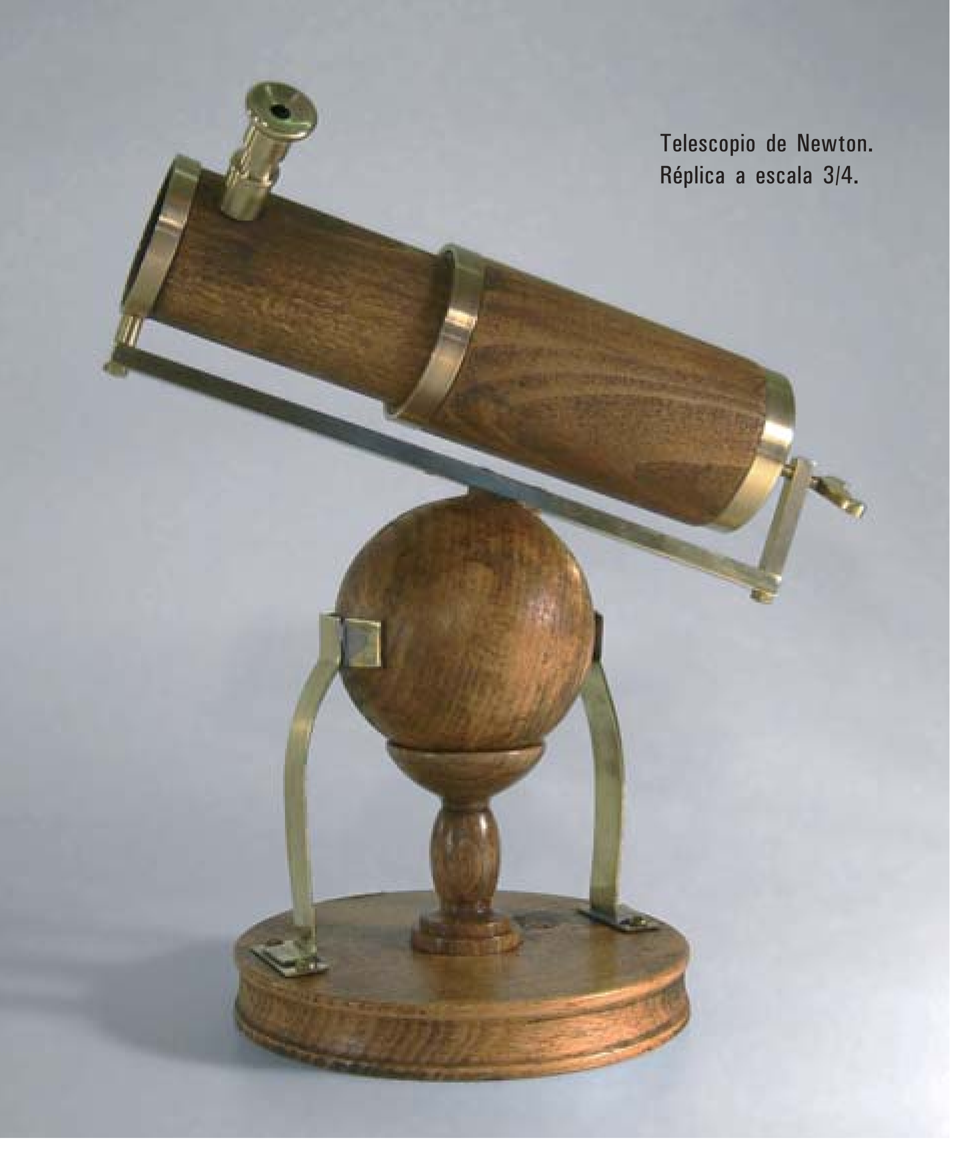
El ocular (u oculares) permite observar y ampliar la imagen producida por el objetivo y desviada por el espejo secundario. En el telescopio original, el ocular era una lente planoconvexa, capaz de proporcionar unos 35 aumentos —excesivos, en la opinión del propio artífice—. Nosotros podemos recurrir a lentes extraídas de cuentahílos, lupas para sellos, etcétera; también podemos acoplar oculares de microscopio o de telescopio. Si bien en ese caso obtendremos un sistema óptico más refinado que el de Newton.

La fórmula para el cálculo del aumento total del telescopio es simple: basta dividir la distancia focal del objetivo

Aspecto de la óptica bien centrada

Fijación del tubo a la varilla (vista frontal)

Esquema óptico



Telescopio de Newton. Réplica a escala 3/4.

por la del ocular. Para conocer la distancia focal del ocular, nos protegeremos con unas gafas de sol, tomaremos una lente simple (de un visor de diapositivas, por ejemplo) y enfocaremos la luz solar sobre un papel blanco. Cuando éste entre en ignición, mediremos la distancia entre el papel y la lupa, que corresponderá, con aproximación suficiente, a la distancia focal de la lente.

Buscaremos lentes de entre 35 y 10 mm de distancia focal; el rango de aumento debe estar comprendido entre los 8× y los 30×. También se obtienen buenos resultados mediante lentes simples provenientes de microscopios de bajo precio y de mirillas para puertas de entrada. Esas lupas se pegan con unos toques de silicona a piezas roscadas de latón, que utilizaremos para el sistema de enfoque o portaocular (son óptimas las piezas usadas en las instalaciones de fontanería). Como base emplearemos una tuerca roscada de 1/2 pulgada, que adheriremos al tubo con epóxido; para el sistema de enfoque, usaremos un casquillo roscado con la misma rosca pero exterior. Para obtener un deslizamiento suave, untaremos las roscas con una grasa viscosa. Conseguiremos así una focalización excelente.

Superadas las tareas ópticas, nos ocuparemos de las optomecánicas. Lo mismo que nuestro ilustre predecesor, construiremos el tubo del telescopio, extensible, en cartón. No nos costará hallar un tubo ya fabricado de 80 mm de diámetro exterior de ese material; suelen tener un diámetro interior de 75 mm.

Pero encontrar un segundo tubo que ajuste en el interior del primero no será tarea fácil. Podemos fabricarlo nosotros mismos a partir de un núcleo cilíndrico de 70 mm de madera barnizada, dividido en dos por un diámetro. Sobre ese núcleo se enrollan capas de papel impregnadas con cola de carpintero diluida en un poco de agua, hasta obtener el diámetro deseado.

Una vez seco, el tubo se desmolda sacando primero un semicilindro y después el otro. Luego se barnizan y pintan ambos tubos para endurecer su superficie. El ajuste final entre los dos tubos se obtiene mediante un par de tiras de terciopelo autoadhesivo que se pegan al tubo interior. Siguiendo el modelo, reforzaremos los extremos con unas tiras de latón bien adaptadas y pegadas con epóxido. Por fin, pintaremos de negro mate la superficie interna.

Para soporte del tubo nos valdrá una varilla de acero convenientemente doblada. En un extremo practicaremos un orificio roscado de M6 donde situaremos la varilla de ajuste de la longitud del tubo para adaptarlo a la focal real del objetivo. Mecanizaremos luego los elementos de la montura, la esfera de 100 mm de diámetro, la copa de soporte y la base redonda de 180 mm. Sirve cualquier madera dura y densa: haya, roble, encina, boj, etcétera. Aunque es posible realizar el mecanizado mediante un taladro y su soporte (que opera a modo de torno), resulta más práctico dirigirse a un tornero de madera o mecánico, que obtendrá sin dificultad esas formas.

El último elemento necesario para proceder al ensamblaje serán las pinzas, de acero forjado, que frenan la esfera. Sirve también una chapa de latón endurecido y recortada como en el dibujo. Para incrementar la fricción entre esos elementos y la esfera —un aspecto que no debemos despreciar—, pegaremos en su cara interior unos trozos de cuero.

Antes de empezar las observaciones deberemos colimar (alinear) el sistema óptico. Supondremos en primer lugar que el eje óptico del objetivo es paralelo al del tubo, sacaremos el ocular y, colocando el ojo en el centro del enfoque, manipularemos la chapa de soporte del espejo secundario hasta ver perfectamente concéntricos el tubo, el objetivo, el espejo secundario y nuestro ojo centrado en él. Retocaremos la altura del secundario y su inclinación; reorientaremos el objetivo presionando suavemente su soporte, hasta que su perímetro sea paralelo al del tubo visto desde el portaocular. Por fin, fijaremos ambas piezas con unas gotas de adhesivo instantáneo.

En función de la bondad del sistema óptico, podremos observar, siempre algo borrosos, un número mayor o menor de cuerpos celestes: de nuestro sistema solar así como del espacio profundo.

Jeffrey D. Sachs

Los refugiados del cambio climático

El calentamiento global limitará las reservas de agua.
Debemos prepararnos para recibir una oleada de migraciones forzosas

Es probable que el cambio climático e hidrológico inducido por el ser humano torne inhabitables o, al menos no rentables económicamente, algunas zonas del planeta. En unos decenios, si no antes, cientos de millones de personas pueden verse obligadas a cambiar de lugar de residencia debido a las presiones ambientales.

El factor fundamental que va a determinar los desplazamientos de estas poblaciones será, en buena medida, el agua. Como se destaca en el nuevo informe del Grupo de Trabajo II del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático, se producirán cambios radicales en la relación de la población con el agua. Entre ellos, posiblemente: el aumento del nivel del mar, ciclones tropicales más violentos, pérdida de humedad del suelo por el aumento de la temperatura, precipitaciones e inundaciones más intensas, sequías más frecuentes y el adelanto de los deshielos glaciares.

Los efectos diferirán según los lugares. Existen por lo menos cuatro tipos de zonas que deberemos vigilar: los asentamientos en las zonas costeras bajas, las regiones agrícolas que dependen de ríos que se nutren de la nieve fundida y el deshielo de los glaciares, las regiones subhúmedas y áridas, y las zonas húmedas del sureste asiático vulnerables a variaciones de los monzones.

Cientos de millones de personas se verán quizás obligadas a cambiar de lugar de residencia.

Un aumento significativo del nivel del mar, incluso de unos centímetros, podría causar estragos en las vidas de decenas, cientos incluso, de millones de personas. Según un estudio, las zonas costeras situadas a menos de 10 metros por encima del nivel del mar constituyen sólo el 2 por ciento del territorio mundial; sin embargo, albergan al 10 por ciento de la población. Estas zonas costeras padecen la subida del mar en las tormentas y la creciente intensidad de los ciclones tropicales. Llamémoslo “efecto Nueva Orleans”.

También se verán afectadas regiones situadas más al interior. Cientos de millones de personas, entre ellas buena parte de los campesinos más pobres, viven en valles cuyo riego depende de ríos que se nutren del deshielo glaciar y la nieve fundida. La nieve se funde más temprano cada año, en sincronía decreciente con una estación estival cada vez más larga, los glaciares están desapareciendo.

Así, la gran mayoría de los campesinos de la llanura indo-gangeática y de la cuenca del río Amarillo en China tendrán que afrontar graves perturbaciones de la disponibilidad de agua. De todas formas, estas regiones ya padecen una intensa presión hidrológica debido a los insostenibles índices de bombeo subterráneo en el norte de China y de India de agua para el riego de vastas extensiones.

En Africa, todo apunta a que las actuales regiones subhúmedas y áridas se secarán aún más, agravando la crisis alimentaria de muchas de las poblaciones más pobres y vulnerables del planeta. El grave descenso de las precipitaciones en el Sahel africano durante los últimos 30 años parece guardar relación con el calentamiento antropogénico y los aerosoles contaminantes. La violencia en Darfur y Somalia tiene que ver con dificultades con el agua y los alimentos. La guerra civil en Costa de Marfil es, en parte al menos, fruto del conflicto étnico surgido tras la huida de la población desde las zonas secas del norte de Burkina Faso hacia la costa. No sería difícil que este caos fuera a peor.

Cada ciclo de El Niño lleva la sequía a miles de islas del archipiélago de Indonesia, con las consiguientes pérdidas de cosechas, hambrunas y combustiones espontáneas de turberas. Algunos climatólogos plantean la hipótesis de que el calentamiento global podría provocar que El Niño fuera más persistente; si así se comportara, los 200 millones de indonesios y las poblaciones cercanas sufrirían sequías perdurables.

Hasta ahora, el debate sobre el clima se ha centrado en la ciencia básica y en los costes y beneficios de reducir las emisiones de gases de invernadero. A partir de ahora nos preocupará cada vez más la urgente necesidad de adaptarnos a los cambios y de ayudar a los más perjudicados.

Algunos lugares muy afectados se salvarán gracias a la mejora de las infraestructuras, que los protegerán de las inundaciones en las tormentas o servirán para economizar agua de regadío. Otros conseguirán pasar de la agricultura a la industria y a los servicios. Aun así, las poblaciones de algunos lugares no podrán adaptarse y lo más probable es que emigren. Sólo ahora empezamos a entender estos fenómenos en términos cuantitativos. Economistas, hidrólogos, agrónomos y climatólogos tendrán que sumar esfuerzos y dar los siguientes pasos para comprender científicamente esta crisis humana.

Jeffrey D. Sachs es director del Instituto de la Tierra de la Universidad de Columbia.

Juan M.R. Parrondo

Números pseudoaleatorios

Aunque pueda parecer extraño, la aleatoriedad es un bien preciado. Ejércitos y empresas de criptografía pagan considerables cantidades de dinero por una fuente segura de números aleatorios, que son también esenciales en una gran variedad de simulaciones por ordenador: fluidos, meteorología, materiales, moléculas, redes sociales, etc.

¿Por qué resulta valioso algo tan ubicuo como el azar? ¿No basta con tirar una moneda al aire para conseguir un resultado aleatorio? En efecto, pero en las aplicaciones mencionadas se necesitan grandes cantidades de bits aleatorios producidos de modo automático. Hay además un cierto grado de "calidad" en las fuentes de números aleatorios. Por ejemplo, el viejo lenguaje de programación BASIC disponía de una función que generaba números aleatorios utilizando lo que el reloj del propio ordenador marcaba cuando la función se ejecutaba.

Es cierto que el instante en que la función se ejecuta depende de muchas variables: momento en que se inicia el programa, longitud de éste, etcétera. Resulta prácticamente impredecible. Sin embargo, las llamadas consecutivas a esa función de números aleatorios no garantizan que éstos gocen de una distribución uniforme y carezcan de correlación alguna. Lo mismo ocurre con los lanzamientos de una moneda, que puede estar ligeramente sesgada.

Pero no faltan algoritmos deterministas que producen números con una aleatoriedad falsa, aunque de "mayor calidad". Como el algoritmo que los genera es predecible, se denominan pseudoaleatorios. Sin embargo, poseen muchas de las propiedades de los números aleatorios, las suficientes como para que sean idóneos en aplicaciones científicas y de simulación. En criptografía se utilizan también; mas, si se necesita un alto grado de seguridad, se recurre a otros métodos de generación, basados en el azar real de fenómenos físicos, como el ruido en los dispositivos eléctricos o incluso las desintegraciones radiactivas.

Uno de los métodos habituales para obtener números pseudoaleatorios son los registros de desplazamiento. Se trata de una serie de registros en donde se almacenan bits, es decir, ceros o unos, que se van desplazando consecutivamente y de modo circular. Si tenemos, por ejemplo, siete registros con los valores iniciales 1011100, desplazamos todos hacia la derecha y el último de ellos, el 0, lo colocamos al principio, el resultado será 0101110. Después del segundo desplazamiento obtenemos 0010111 y así sucesivamente. Obviamente, el estado inicial se recupera tras siete pasos, dando lugar a una secuencia bastante trivial. Sin embargo, una sencilla modificación de estos desplazamientos circulares genera secuencias bastante complejas. La modificación consiste en colocar como primer dígito no el último registro, sino una combinación de éste y algunos otros, que se llaman llaves. El algoritmo resultante se denomina registro de desplazamiento con retroalimentación lineal o LFSR (por Linear Feedback Shift Register).

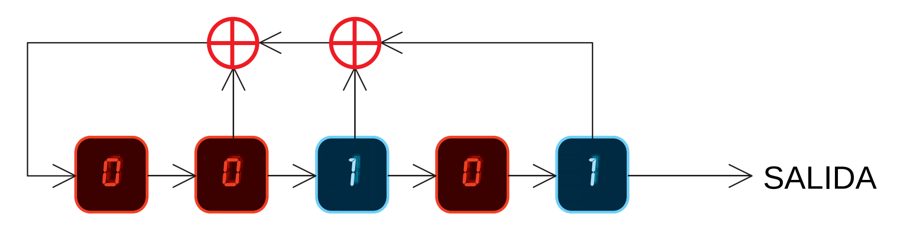
En la figura 1 podemos ver un LFSR con cinco registros. En cada desplazamiento, el primero se obtiene combinando tres llaves: el último, el segundo y el tercer registro. Estas combinaciones se representan en la figura mediante flechas y el símbolo $\oplus$ que denota una operación lógica muy simple entre dos números binarios: si los dos números son iguales, el resultado de la operación será 0; si son distintos, el resultado será 1. La operación se conoce como "disyunción exclusiva" o *exclusive or* (XOR) en inglés, porque, si 1 representa "cierto" y 0 "falso", entonces $p \oplus q$ es equivalente a "*p* o *q*, pero no las dos a la vez". Matemáticamente la operación $\oplus$ tiene también una interpretación sencilla. Es la suma módulo 2 de sus dos operandos:

$$x \oplus y = (x + y) \bmod 2$$

en donde a mod 2 es igual al resto cuando se divide a entre 2, es decir, 0 si a es par y 1 si es impar.

En el LFSR, el primer registro es simplemente la suma módulo 2 de todas las llaves. Para la configuración de la figura 1, las tres llaves tienen valores 0, 1 y 1 respectivamente, por lo que $0 \oplus 1 \oplus 1 = 0$ es el nuevo valor del primer registro. Desplazamos los demás hacia la derecha y obtenemos la combinación 00010. Un nuevo paso daría 00001, y así sucesivamente. De todas estas configuraciones, vamos tomando como salida del algoritmo en cada paso el último de los registros. La cadena de bits de salida en nuestro ejemplo sería entonces 10100... Los cinco primeros bits de esta cadena son los de la configuración inicial. Mas, a partir del sexto, la secuencia adquiere mayor complejidad.

Como vemos, un LFSR queda determinado por el número de registros y por las llaves utilizadas. Como el último de los registros es siempre una llave (si así no ocurriera, el LFSR sería equivalente a uno con menos registros), basta indicar todas las llaves para describir un LFSR. Las llaves suelen escribirse en orden decreciente entre corchetes, de modo que la primera da el tamaño total del LFSR. El de la figura 1 sería el [5 3 2].



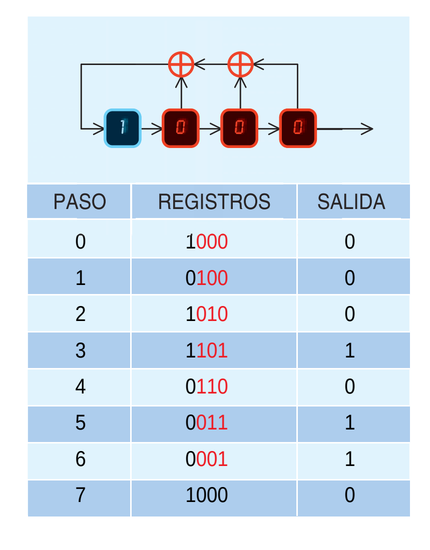
1. Esquema de un registro de desplazamiento con retroalimentación lineal (LFSR).

Una familia de LFSR especialmente útiles para la generación de números pseudoaleatorios la forman los llamados LFSR maximales. Un LFSR maximal de n registros pasa por todos y cada uno de los posibles estados, salvo por el compuesto por n ceros. Como hay 2^n posibles estados con n registros, este tipo de LFSR da lugar en su salida a series de bits que se repiten sólo cada $2^n - 1$ pasos. Basta con 20 registros para obtener un período de un millón de bits. Con 50 registros, el período de la secuencia alcanza tal magnitud, que cualquier aplicación práctica queda muy lejos del mismo.

Pero no todos los LFSR son maximales. Veamos un par de ejemplos con cuatro registros: el [4 3] y el [4 3 2]. En las tablas se distingue la evolución de los estados en cada uno de los registros, empezando ambos con 1000. He coloreado en rojo los dígitos llave con los que se obtiene, mediante suma módulo dos, el primer dígito en el siguiente paso. El primer LSFR es maximal, generando una secuencia de período 15. Sin embargo el segundo, a pesar de tener más llaves, no lo es. El estado original se recupera al cabo de 7 pasos. Por lo tanto, la secuencia de salida en este LFSR se repite cada 7 bits.



PASO	REGISTROS	SALIDA
0	1000	0
1	0100	0
2	0010	0
3	1001	1
4	1100	0
5	0110	0
6	1011	1
7	0101	1
8	1010	0
9	1101	1
10	1110	0
11	1111	1
12	0111	1
13	0011	1
14	0001	1
15	1000	0



PASO	REGISTROS	SALIDA
0	1000	0
1	0100	0
2	1010	0
3	1101	1
4	0110	0
5	0011	1
6	0001	1
7	1000	0

Cuando un LFSR es maximal no sólo genera una cadena de bits de período largo (el más largo posible), sino que estas cadenas guardan un estrecho parecido con cadenas de bits genuinamente aleatorios. En todas ellas hay prácticamente la misma cantidad de unos que de ceros (el número de unos es igual al número de ceros más uno). Unos y ceros que se hallan distribuidos de manera muy parecida a como lo estarían si fueran aleatorios. Consideremos las subcadenas de dígitos consecutivos iguales y sus tamaños. Por ejemplo, en la cadena generada por [4 3], 000100110101111, las secuencias consecutivas tienen longitudes 3(0), 1(1), 2(0), 2(1), 1(0), 1(1), 1(0), 4(1); es decir, hay cuatro secuencias de longitud 1 (dos de ceros y dos de unos), dos secuencias de longitud 2 (una de ceros y una de unos), una secuencia con 3 ceros y otra con 4 unos.

La salida de cualquier LFSR maximal tiene ese tipo de propiedad: hay un total de 2^{n-1} secuencias consecutivas, de las cuales la mitad presenta longitud 1, una cuarta parte longitud 2, 1/8 longitud 3, etc. En cada caso, siempre la mitad de ellas son de unos y la otra mitad de ceros, salvo para secuencias consecutivas cercanas al número de registros: sólo hay una con $n - 1$ ceros y otra con n unos. Todo esto es precisamente lo que se esperaría, aunque con fluctuaciones, en una larga cadena de bits genuinamente aleatorios.

Los LFSR maximales son, por tanto, ideales como generadores de números aleatorios. De hecho, el principal objetivo de la teoría matemática de los LFSR es caracterizar cuáles de ellos son maximales. La caracterización completa requiere una matemática ligeramente refinada, basada en la factorización de polinomios. Pero algunas características de los LFSR maximales son sencillas: deben tener un número par de llaves (incluido el último registro) y las llaves deben ser números primos entre sí.

Las cadenas generadas por LFSR maximales guardan aún más similitudes con cadenas aleatorias. Sin embargo, como es evidente, son cadenas completamente deterministas: conocido el LFSR y su estado inicial, podemos predecir la cadena entera. ¿Hay algún modo de distinguir entre una de estas cadenas y una genuinamente aleatoria? Los LFSR maximales suelen pasar casi todas las pruebas de aleatoriedad cuando se aplican a cadenas mucho menores que el período.

Existen algoritmos diseñados específicamente para detectar LFSR. De hecho, una definición de complejidad, la complejidad lineal, se basa en los LFSR: la complejidad lineal de una cadena de bits es el mínimo LFSR que la genera. Hay un algoritmo para encontrar la complejidad lineal de una cadena y, por tanto, el LFSR que la genera. Este algoritmo forma parte de la batería de pruebas de aleatoriedad estándar.

En cualquier caso, la aleatoriedad sigue siendo un fenómeno misterioso. La única definición objetiva y basada en las propiedades de una cadena y no en el método como se ha obtenido es la dada por Kolmogorov. La complejidad de Kolmogorov de una cadena es la longitud del programa más pequeño que la genera. La complejidad lineal constituye, en realidad, un caso particular, pero sólo contempla programas basados en LFSR, mientras que la de Kolmogorov hace referencia a cualquier programa capaz de correr en cualquier ordenador. Una cadena aleatoria es aquella cuya complejidad es igual a su tamaño, es decir, es incompresible. Pero no existe ningún método para calcular la complejidad de Kolmogorov. Para eso tendríamos que ser capaces de detectar cualquier pauta o diseño, por ocultos que estuvieran, en los ceros y unos de una cadena de bits.

Mark Fischetti

TENIS: EL SISTEMA HAWKEYE

¿Dentro o fuera?

En los torneos de tenis más importantes ya tiene su lugar en la cancha un nuevo participante: el sistema de seguimiento Hawkeye ("Ojo de halcón"), que determina si una pelota bota dentro, fuera o sobre la raya.

Las diez videocámaras del Hawkeye alimentan con 24 gigabytes de datos a un programa de videoprocesado que sigue en tiempo real la posición de cada servicio y cada golpe. Las televisiones empezaron a emplear ese sistema en 2002 para mejorar los comentarios de las retransmisiones. En marzo de 2006 el NASDAQ-100 Open fue el primer torneo del circuito profesional en que se permitió a los jugadores cuestionar las observaciones del juez de línea, dejando la decisión final en manos de un responsable de evaluación que consultaba el Hawkeye.

Este año se está empleando ese dispositivo de seguimiento en todos los torneos *Grand Slam* y *Masters* que no se jueguen en tierra batida. A cada jugador se le conceden dos recusaciones en cada set. Mientras dura la revisión, y para que participe el público, en algunos estadios se muestra una reproducción generada por ordenador a partir de los datos del Hawkeye. Según Paul Hawkins, inventor del sistema y fundador de Hawkeye Innovations en Winchester, el Hawkeye ha invalidado hasta ahora entre un 33 y un 40 por ciento de las decisiones arbitrales cuestionadas.

Hawkins, ingeniero experto en procesado visual, desarrolló ese sistema originalmente para el críquet. Los comentaristas de televisión usan el Hawkeye para analizar los lanzamientos hacia el bateador. No se ha adoptado, en cambio, para las recusaciones. Según Hawkins, se trata de una cuestión cultural. La Liga de Béisbol tampoco ha mostrado interés por el Hawkeye porque las decisiones de un árbitro de base-meta sobre los lanzamientos (*strikes*) son fundamentales para el juego.

A los tenistas les agrada el Hawkeye porque, afirman, mejora la certeza de las decisiones arbitrales. A los jueces les alivia la tensión que sufren conforme los saques y demás golpes se hacen cada vez más rápidos. Los aficionados parecen disfrutar de las acaloradas discusiones que provocan las pelotas dudosas. El coste de instalación y utilización del Hawkeye varía entre 30.000 y 35.000 euros por semana y pista.

Con pocos retoques, el sistema Hawkeye analizaría en directo todos los golpes. Emitiría un sonido determinado cuando una pelota cayera fuera de los límites de la pista, con lo que se prescindiría de los jueces de línea. Sin embargo, la propuesta no tiene éxito, porque preocupa que el juego resulte demasiado monótono y pierda emoción, dice Hawkins. Por ahora, tenemos un buen equilibrio entre lo humano y la técnica.



1. POSICION DE LA BOLA. En distintas posiciones en torno a la cancha se sitúan diez cámaras. Cada una de ellas monitoriza la mitad de la cancha; envía la señal de vídeo a su propio ordenador, instalado en una cabina de control, donde otros cuatro ordenadores combinan los flujos de información.

3. TOMAS INDEPENDIENTES. El ordenador de cada cámara determina la posición bidimensional de la pelota en un único cuadro.

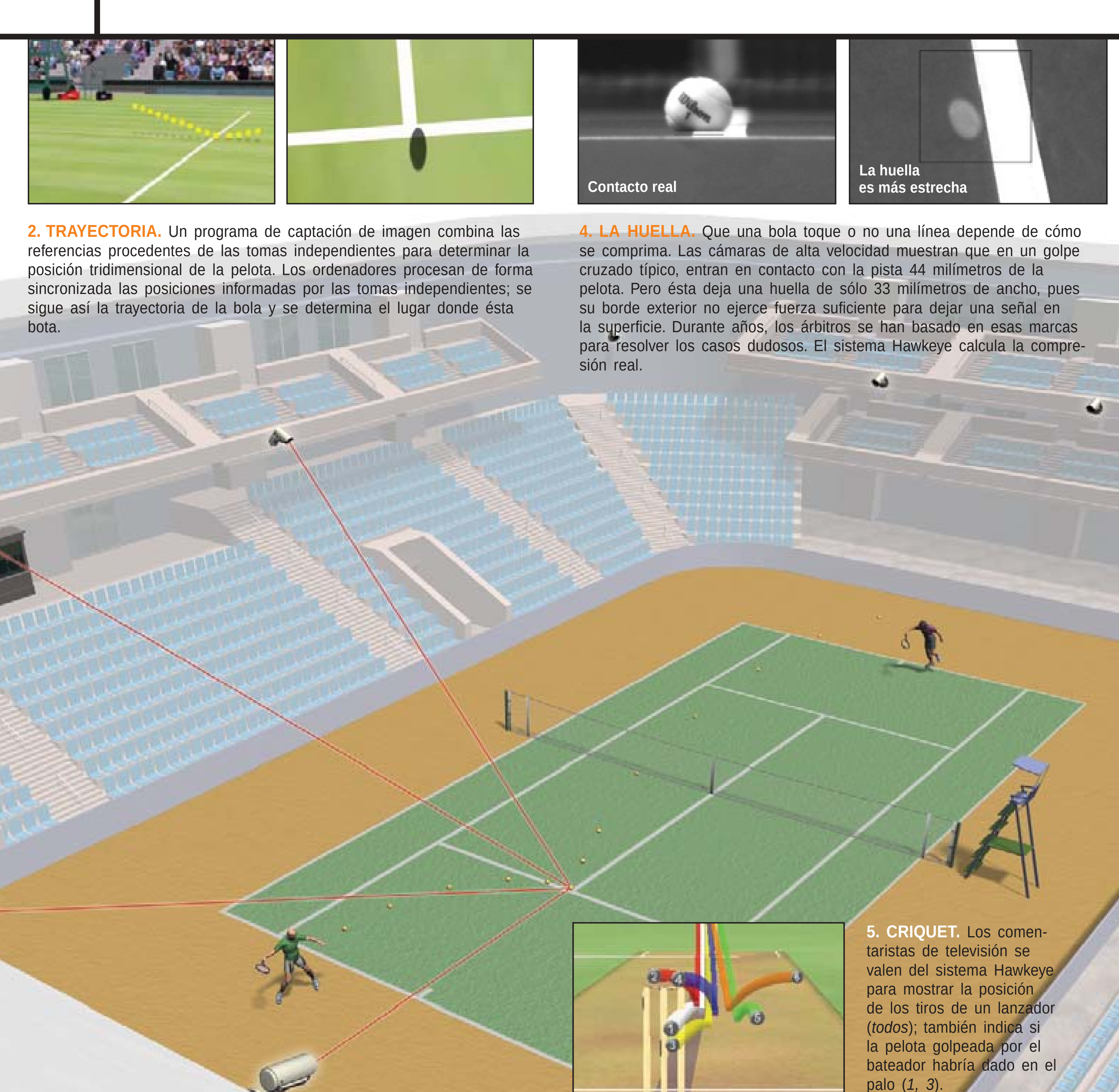
5W INFOGRAPHICS (*ilustración de fondo*); HAWKEYE INNOVATIONS (*insertos*)

¿SABIA USTED QUE...?

➤ **CYCLOPS:** En ciertos torneos se ha empleado el sistema Cyclops (Cíclopes) para determinar si una pelota servida rebasa la línea de saque. Un pequeño dispositivo situado en un costado de la cancha envía haces infrarrojos de un lado a otro de la línea de saque hacia un receptor que hay en el otro costado. Si la pelota intercepta los haces, Cyclops emite un sonido que indica que el servicio fue largo. Hawkeye, que monitoriza todas las líneas, realiza esa función en los encuentros de tenis más importantes. En la opinión de Paul Hawkins, el inventor de Hawkeye, Cyclops representó un gran avance técnico, pero su ciclo vital toca a su fin.

➤ **TIERRA BATIDA:** El sistema Hawkeye se ha instalado en pistas rápidas y de hierba. Los organizadores de torneos en tierra batida no lo han considerado porque, según ellos, la bola deja una señal clara que los jueces pueden examinar. Pero pruebas independientes muestran que esa marca puede ser mayor que la huella de la pelota comprimida, ya que un impacto fuerte desplaza la tierra de alrededor.

➤ **VENTAJAS:** Las cadenas de radio y televisión designan al sistema Hawkeye con sus propias etiquetas: ESPN, por ejemplo, lo llama ShotSpot. Una empresa de Toronto comercializa el Auto-Ref, un sistema competidor que emplea cámaras y que no ha recibido gran atención. Todas las innovaciones técnicas se examinan en el Congreso Anual Internacional sobre Ciencia y Tecnología del Tenis de la Federación Internacional de Tenis, que este mes se celebra en Londres.



2. TRAYECTORIA. Un programa de captación de imagen combina las referencias procedentes de las tomas independientes para determinar la posición tridimensional de la pelota. Los ordenadores procesan de forma sincronizada las posiciones informadas por las tomas independientes; se sigue así la trayectoria de la bola y se determina el lugar donde ésta bota.

4. LA HUELLA. Que una bola toque o no una línea depende de cómo se comprima. Las cámaras de alta velocidad muestran que en un golpe cruzado típico, entran en contacto con la pista 44 milímetros de la pelota. Pero ésta deja una huella de sólo 33 milímetros de ancho, pues su borde exterior no ejerce fuerza suficiente para dejar una señal en la superficie. Durante años, los árbitros se han basado en esas marcas para resolver los casos dudosos. El sistema Hawkeye calcula la compresión real.

5. CRIQUET. Los comentaristas de televisión se valen del sistema Hawkeye para mostrar la posición de los tiros de un lanzador (*todos*); también indica si la pelota golpeada por el bateador habría dado en el palo (*1, 3*).

LIBROS

Biología de sistemas

Una nueva disciplina

SYSTEMS BIOLOGY. PROPERTIES OF RECONSTRUCTED NETWORKS, por Bernhard O. Palsson. Cambridge University Press; Cambridge, 2006.

LIFE: AN INTRODUCTION TO COMPLEX SYSTEMS BIOLOGY, por Kunihiko Kaneko. Springer-Verlag; Berlín, 2006.

CELLULAR AUTOMATON MODELING OF BIOLOGICAL PATTERN FORMATION. CHARACTERIZATION, APPLICATIONS, AND ANALYSIS, por Andreas Deutsch y Sabine Dormann. Birkhäuser; Basilea, 2004.

No parece discutible la eficacia mostrada por los enfoques reduccionistas en el progreso de la biología. Con su aplicación se han ido identificando a un ritmo sostenido los componentes celulares y sus mutuas interacciones. Pero no bastan tales métodos, a la postre genéticos y deterministas. Para entender el funcionamiento global de la célula, sus propiedades emergentes, se requieren nuevos enfoques, que contemplen el pluralismo de causas y efectos observados en una trama de redes biológicas. Se impone, con ese fin, recurrir a mediciones simultáneas de componentes múltiples e integrar los resultados en modelos matemáticos (*Systems Biology. Properties of Reconstructed Networks* y *Life*: *An Introduction to Complex Systems Biology*). La tendencia reduccionista tomó renovado impulso con el advenimiento de la genómica, con la primera secuenciación completa de un genoma en 1995. La nueva disciplina hace especial énfasis en los nexos entre las ideas matemáticas y los procesos biológicos. (Un enfoque cuya virtualidad se ha demostrado en la modelización de la biología del desarrollo, como se hace en *Cellular Automaton Modeling of Biological Pattern Formation. Characterization, Applications, and Analysis*.)

Ahora, la biología tiene ante sí un reto formidable: descubrir la organización y las interacciones de las redes celulares, que posibilitan la mitosis, el desarrollo y otros procesos complejos. Tales interacciones varían en su naturaleza (reguladores, estructurales y catalíticos), en sus efectos y en su fuerza. De ellas se ocupa la biología de sistemas, que, para describir las redes, se sirve de matrices estequiométricas. Las columnas de una matriz estequiométrica representan reacciones químicas; las filas, compuestos. Asociada con esta matriz tenemos información adicional sobre la formación de complejos de enzimas, niveles de transcripción, marcos de lectura y localización de proteínas.

Cabe esperar que la biología de sistemas avance en cuatro líneas principales: identificación de los componentes del sistema en consideración y su cuantificación genómica (ARNm), proteínas y metabolitos de bajo peso molecular; determinación de las interacciones entre componentes; inferencia computacional de la estructura, tipo y cantidad de interacciones entre componentes; por fin, integración de los datos heterogéneos. La última vertiente busca lograr una comprensión holística, cuantitativa y predictiva a través de modelos matemáticos que permitan un ciclo iterativo entre predicción y experimentación.

Demos un ejemplo. La función coordinada de múltiples productos génicos constituye un “circuito genético”. Cada circuito desempeña una misión peculiar, distintiva. Por citar algunas de común interés y que subyacen en el plan fundamental de los organismos: replicación de ADN, su traducción en proteínas o conversión de glucosa en piruvato. El proceso

La biología de sistemas estudia la formación de redes que generan las funciones celulares.

se inicia con la catalogación de los componentes, sigue con el análisis de sus interacciones para construir los "diagramas de cableado" de los circuitos genéticos, donde se recrean las redes de reacciones bioquímicas y se avanza un paso más con la descripción matemática de las redes construidas. Los modelos *in silico* de redes reconstruidas se van refinando de una manera iterativa con los resultados obtenidos en la investigación.

Aunque se declara a menudo que el pensamiento reduccionista ha caracterizado a la biología molecular, no significa que el pensamiento integrador u holista no hubiera existido. Los primeros circuitos genéticos se cartografiaron hace más de cuarenta años. La inhibición retroactiva de las vías sintetizadoras de aminoácidos fue descubierta en 1957 y la regulación transcripcional condujo a la definición del operón *lac*. En las postrimerías de los años cincuenta y principios de los sesenta, se puso empeño en elaborar modelos matemáticos para simular las funciones de los circuitos genéticos recién descubiertos. Por esa época, antes incluso de la difusión de los ordenadores digitales, la función de tales circuitos se remedó en computadores analógicos. En la onda de esos trabajos, se pergeñaron, llegados los setenta, simulaciones dinámicas de extensas redes metabólicas. Recién obtenida la secuenciación automática de ADN, surgieron, a finales de los ochenta y comienzos de los noventa, los modelos de la mitosis y otros procesos. En buena medida, pues, la biología de sistemas tiene historia a sus espaldas.

Admitimos que una célula es la misma una semana más tarde, aun cuando la mayoría de sus componentes se hayan sustituido. De ahí que un rasgo clave de los sistemas vivos sea cómo se traban juntos componentes y células. Las interconexiones entre células y componentes celulares definen la esencia de un proceso vivo. Los componentes vienen y se van. Todos tienen un tiempo finito de recambio. La mayoría de los metabolitos se reciclan cada minuto; la vida media de las moléculas de ARNm se extiende unas dos horas en las células humanas; cada día se recambia un 3 por ciento de la matriz extracelular en el músculo cardíaco. Las células de la médula ósea humana se van reemplazando cada dos o tres días; la tasa de renovación de la piel es del orden de cinco días a un par de semanas; el revestimiento del epitelio intestinal, cada 5-7 días y los tejidos más lentos, como el hígado, renuevan su celularidad una vez al año. No obstante, consideramos que un individuo es el mismo, aunque más viejo.

Los nexos entre componentes moleculares vienen dados por reacciones

Einstein inteligible

IT'S ABOUT TIME. UNDERSTANDING EINSTEIN'S RELATIVITY, por N. David Mermin. Princeton University Press, 2005.

El profesor N. D. Mermin, que ha cultivado con éxito diferentes campos de la física y goza de una larga experiencia en el campo de la divulgación científica, tiene sus razones para publicar un nuevo texto sobre la teoría de la relatividad especial (TRE, de aquí en adelante), tal vez la más famosa teoría científica de todos los tiempos. Piensa que es hora de dar forma de libro a la experiencia recogida durante casi cuarenta años de cursos y conferencias dirigidas a un público variopinto, sin formación específica en el campo de la física.

Para justificar su reciente publicación el autor alega la originalidad de una presentación con la que aspira a introducir en las intimidades de la TRE a un amplio abanico de público no especializado. Por supuesto, no es el primer autor con tales pretensiones. Un ejemplo digno de mención es el libro de B. Hoffmann —un antiguo colaborador de Einstein— titulado *La relatividad y sus orígenes* (Editorial Labor, 1985), en el que prima la aproximación por la vía histórica; aspecto éste apenas tenido en consideración por Mermin. Por contra, las nociones físicas y matemáticas que éste presupone —álgebra elemental y geometría plana de triángulos, esencialmente— no superan a las que un estudiante medio habría de haber adquirido en la enseñanza secundaria. Hay que dejar constancia del esfuerzo del autor por evitar el formalismo matemático que enmarca las presentaciones habituales, a las que califica como "espantosas".

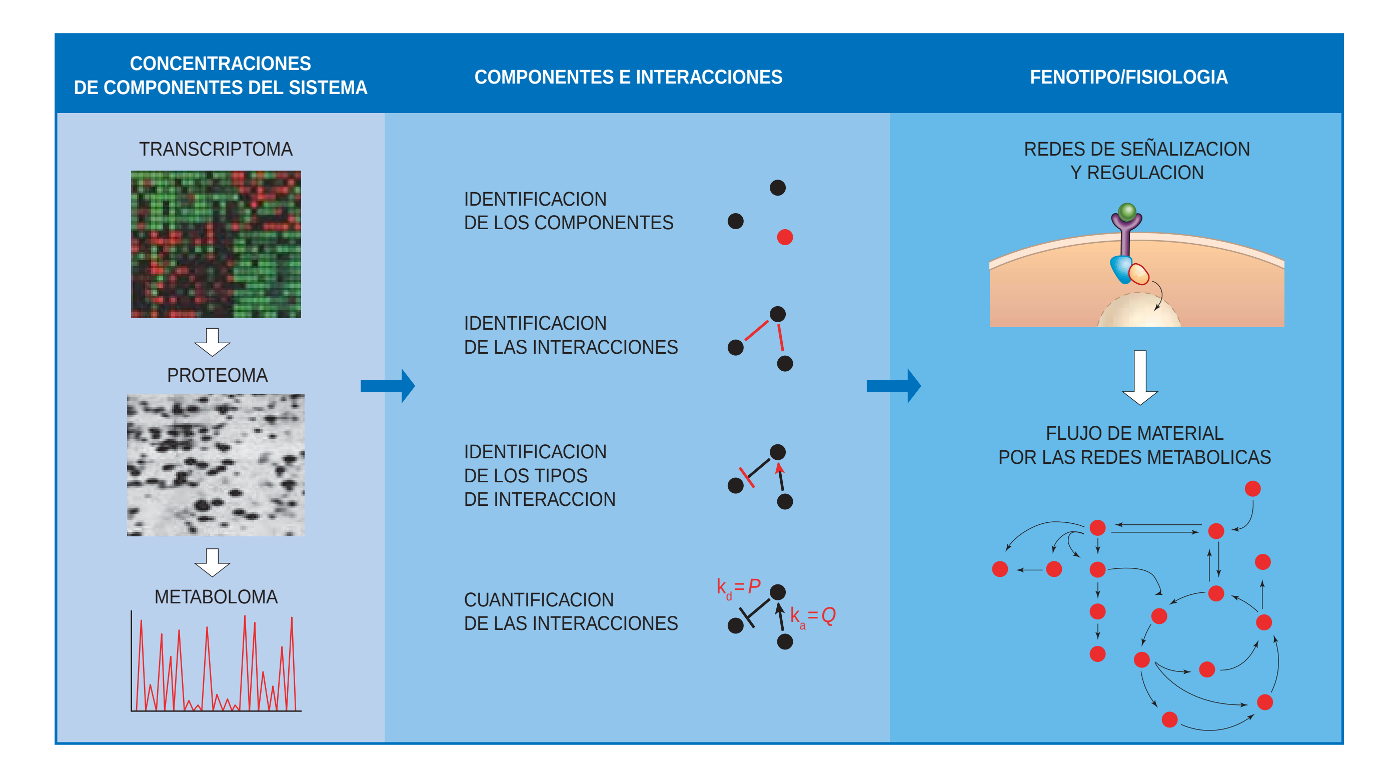
La propuesta de Mermin pasa por desarrollar previamente la intuición del lector —un tanto anquilosada, en general— acerca de la relación entre dos descripciones posibles: la que efectúa un viajero desde un tren con movimiento rectilíneo uniforme al observar sucesos en la estación y la que efectúa un observador sentado en un banco de la misma al observar sucesos en aquel tren. El autor piensa que sin alcanzar una mínima familiaridad con este tipo de descripciones "es imposible empezar a entender la relatividad".

Mermin introduce pronto las bases de la TRE: el principio de relatividad y el de la constancia de la velocidad de la luz. Su análisis intuitivo pasa por la comparación entre los respectivos puntos de vista de Alice y de Bob —los observadores del tren y de la estación—, lo que evita recurrir explícitamente a los *sistemas de referencia inerciales*. Razonamientos ingeniosos hacen aparecer ante el lector rasgos tan esenciales de la TRE como la falta de objetividad del concepto *simultaneidad*, el "extraño" comportamiento de la luz y sus implicaciones, la contracción de la longitud de los objetos en movimiento y el significado de la famosísima expresión $E = mc^2$. El autor insiste muy especialmente en el retraso que experimentan los relojes al viajar; insistencia que refleja ya en el título del libro.

En el penúltimo capítulo —el último está dedicado a reflexionar sobre lo expuesto— se hace una ligerísima incursión en el campo de la teoría de la relatividad general, introducida por Einstein en 1915. Aquí el autor, pienso que con buen criterio, se limita a exponer tan sólo un aspecto de la misma: la influencia de la gravedad en el transcurrir del tiempo, con las implicaciones que ello conlleva en la construcción del moderno GPS ("global positioning system"), por ejemplo.

A buen seguro que el libro de Mermin no revolucionará la didáctica de la relatividad, pero sí puede representar una ayuda eficaz para dos clases de lectores: el lego con formación escasa pero con máxima motivación y el divulgador científico, que puede encontrar allí una serie de argumentos y situaciones útiles para su labor.

—LUIS NAVARRO VEGUILLAS



químicas o asociaciones moleculares. Esos nexos se rigen por reglas químicas fundamentales. Identificados todos los nexos o conexiones de una red, pueden determinarse sus estados funcionales. Aunque podemos estudiar las propiedades topológicas de una red, éstas nos aportan sólo una información limitada sobre su estado funcional real. Los estados funcionales de redes de reacciones biológicas quedan condicionados por la naturaleza fisicoquímica del entorno intracelular: las células se encuentran cercanas al estado cristalino. La densidad de proteínas en el citoplasma y mitocondrias es muy próxima a la densidad de proteínas en un cristal proteínico.

Disponemos de varios métodos experimentales para determinar la composición química de las células a escala genómica. Recordaremos, a este respecto, la secuenciación y anotación de genomas enteros (genómica), la medición de las moléculas de ARNm sintetizadas bajo determinadas condiciones (transcriptómica), la concentración de proteínas, las interacciones y sus estados funcionales (proteómica), medición de la presencia y concentración de metabolitos (metabolómica) y flujos metabólicos (fluxómica). La función de las células se basa sobre redes complejas de interacción entre reacciones químicas cuidadosamente organizadas en el espacio y el tiempo.

Las redes complejas que operan en el interior celular se reparten en distintas clases: metabólicas, reguladoras o señalizadoras, por citar algunas. Las redes reguladoras transcripcionales determinan el estado de expresión de un genoma. Las redes reguladoras, a su vez, se dividen jerárquicamente en operones, regulones y estimulones, fundados en el alcance de la respuesta transcripcional. Por su parte, la transducción de señales implica la transmisión de información extracelular hacia el interior del núcleo, incluidos los cambios de expresión génica. Las redes de señalización tienen propiedades combinatorias. Una vez que un tipo particular de molécula se haya adherido a un receptor inserto en una membrana celular, se transmite una señal hacia el interior de la célula que insta una respuesta particular. En general, en esa transmisión habrá una enzima quinasa que promueva un tipo de reacción, otra quinasa que promueva la reacción involucrando a la primera quinasa es, incluso, otra quinasa como catalizador para la segunda quinasa. En breve, la transmisión de señales se realiza a partir de una reacción que consta de varios niveles.

Una característica interesante de las redes biológicas es el autoensamblaje de componentes. Otra: conforme las redes van incrementado su tamaño, el número potencial de estados funcionales que, en razón de la combinatoria, pueden adoptar, crece más rápidamente que el número de componentes de la red. Esa proliferación en el número de estados funcionales parece acontecer pasado el umbral de unos pocos componentes que convergen en la formación de una red. Por tanto, el número de funciones fenotípicas derivables de un genoma no sigue una escala lineal con el número de genes alojados en un genoma. Por ejemplo, el genoma humano podría tener sólo un 50 por ciento más genes que el genoma de *Caenorhabditis elegans*, pero los seres humanos despliegan fenotipos más complicados y en una mayor variedad. Además, las redes biológicas evolucionan; cambian con el tiempo. Son *variantes con el tiempo*. Y tienen un *sentido* o *propósito*. El propósito fundamental es la supervivencia.

Aunque central, un caso particular de la biología de sistemas es la descripción de la composición mínima que nos permite reconocer algo como vivo: ¿Qué es la vida? ¿Ofrece la biología molecular una respuesta satisfactoria? Cuando los investigadores se embarcaron en el estudio de sistemas complejos, hará unos veinte años, su interés princi-

pal consistía en pergeñar una teoría sobre los sistemas biológicos. Hasta el momento, tales empeños se han circunscrito a los sistemas dinámicos con muchos elementos o a procesos lejos del equilibrio. Aunque ambos enfoques, los sistemas dinámicos y la física estadística, aportan un marco teórico para el estudio de los sistemas biológicos, se han comprobado sus limitaciones. No bastan para entender el sistema de la vida. Se confía en la biología constructiva, que iría recreando la teoría y la praxis de los rasgos básicos de un sistema

Geología histórica

NAISSANCE DE LA GÉOLOGIE HISTORIQUE. LA TERRE, DES "THÉORIES" À L'HISTOIRE, por Gabriel Gohau. Vuibert-Adapt, Collection "Inflexions". París, 2003.

Lo que los geólogos denominan geología histórica es una disciplina relativamente moderna. Parte de la pretensión de los geólogos por reconstruir la dilatada y compleja historia del planeta Tierra en el contexto del sistema solar y del universo. Para ello se apoyan en el estudio del fragmentario registro de información accesible a la observación directa de las rocas o en la información que llega a través de sistemas de sondas espaciales.

No ha sido placentero el esfuerzo del pensamiento científico para llegar a unos principios epistemológicos que fundamentasen un proyecto interdisciplinar como es el de la geología histórica. Esta, sin duda, es una disciplina de síntesis que se apoya en los logros, entre otras, de la paleontología, la estratigrafía y la sedimentología, la tectónica y la geografía física, la petrología y la petrogénesis, la mineralogía y la geoquímica, la geofísica y la astrofísica, la planetología y la astronomía, las ciencias de la vida y las ciencias de la evolución.

Desde un punto de vista epistemológico, el profesor Gabriel Gohau postula que la construcción de las ciencias de la Tierra ha tenido un fuerte contenido social, y que los cambios en las teorías geológicas se han ido sucediendo de forma "revolucionaria" a lo largo de pocos siglos. Entre el gradualismo continuista de Karl R. Popper y los paradigmas y revoluciones de Thomas S. Kuhn, se decanta por este último. Desde esa perspectiva, la aventura metodológica y conceptual hacia la moderna geología histórica transita inicialmente desde las teorías de René Descartes (1596-1650) y Robert Hooke (1635-1703) hasta el gran Niels Steensen (Nicolás Steno, 1638-1686), que pone los rudimentos para que la geología pueda ser considerada auténtica "ciencia" de pleno derecho. Steno fue el primero en fundamentar científicamente unos "principios" metodológicos en 1669 que permitieron reconocer que la historia de la Tierra, o al menos la de la Toscana, puede ser reconstruida a partir de la observación de las rocas y de "los cuerpos sólidos contenidos dentro de los cuerpos de las rocas".

Pero aún restaba mucho tiempo para que los incipientes geólogos reconociesen que en el pasado la Tierra atravesó distintas épocas de amplitud mundial, que han quedado registradas en las rocas, y que pueden ser reconocidas a partir de los fósiles que éstas contienen. La *Telluris Theoria Sacra* de 1681 de Thomas Burnet (1635-1715) puede ser un primer intento de elaborar una "Teoría de la Tierra" basada tanto en los datos bíblicos como en los de observación de las montañas. Esta abriría el debate que se consolida en las *Epocas de la Naturaleza* (1779) de Jean Louis Leclerc, más conocido como Buffon (1707-1788).

Mientras tanto, en Edimburgo, James Hutton (1726-1797) había presentado en 1785 en la Sociedad Científica de su ciudad un farragoso ensayo al que tituló *Theory of the Earth*. Una de las hipótesis recurrentes es la existencia de varias "épocas" sucesivas en el pasado geológico de la Tierra que pueden identificarse en el estilo tectónico de las cordilleras.

Sin embargo, el avance más importante en la historia de una disciplina científica e histórica sobre la Tierra se dará con el desarrollo de la estratigrafía, el estudio de la sucesión espacial, y por ello temporal, de las capas de rocas sedimentarias que cubren la Tierra y que se depositaron muy lentamente, sobre todo en medio marino, a lo largo de tiempos muy dilatados. Esas rocas contienen, como ya apuntó Steno, restos de seres vivos del pasado. Demostrar que esos seres vivos petrificados no se distribuyen de forma aleatoria, sino que son diferentes a lo largo de la secuencia de rocas sedimentarias, fue una tarea larga en la que tuvo un papel crucial, según Gohau, Georg-Christian Füchsel (1722-1773).

El paso siguiente lo dará un hombre de ideas que hoy consideramos equivocadas pero que favoreció el avance metodológico de la geología: el minero Abraham Gottlob Werner (1749-1817). Su hipótesis genial consistía en reconocer que esos procesos estratigráficos estudiados por Füchsel en Turingia se podían extender a todo el mundo. Los procesos históricos de la Tierra tienen vigencia universal. Y por ello, se pueden comparar los estratos de Alemania con los de Francia y con los de otros países, pues los procesos geológicos han sido idénticos y de amplitud planetaria.

En el límite entre el siglo XVIII y el XIX, Georges Cuvier (1769-1832), Alexandre Brongniart (1770-1847) y Jean-André Deluc (1727-1817), entre otros, dedicaron su vida al reconocimiento de las secuencias históricas de las épocas pasadas de la Tierra que pueden ser identificadas con el estudio de los fósiles contenidos en los estratos. La Tierra comienza a ser considerada como un cuerpo sideral con una larga historia que puede desvelarse por sus "monumentos" naturales (como ellos los llamaban). Tres figuras destacan en la consolidación de un paradigma histórico de la Tierra: en las islas Británicas, William Smith (1769-1839), que pone las bases de la estratigrafía basada en los fósiles y Charles Lyell (1797-1875), que en sus *Principles of Geology* (1830-1834) pone las bases de la geología moderna, aunque nunca reconoció el hecho de la evolución biológica. En Francia, destaca Alcide d'Orbigny (1802-1857), creacionista convencido, que tal vez por ello, supo llevar la estratigrafía basada en algunos grupos de invertebrados marinos, como por ejemplo los cefalópodos, a altos niveles de resolución temporal.

Tal vez el trabajo de Gohau quede pretendidamente incompleto. Este no desarrolla suficientemente la nueva problemática que ya aparece en el siglo XIX relacionada con la geología histórica: la introducida sobre todo por Charles Darwin (1809-1882) en torno a la evolución biológica y su registro geológico así como a la problemática, relacionada con ésta, del tiempo geológico necesario para tales procesos naturales. El debate sobre la evolución biológica y sobre lo que Hutton llamaba "el abismo del Tiempo" cubre una etapa importante del debate interdisciplinar sobre la geología histórica que Gohau no considera oportuno desarrollar aquí.

—LEANDRO SEQUEIROS

Divagaciones

EXPLORACIÓ, JOC I REFLEXIÓ, por Joandomènec Ros. Pagès editors; Lérida, 2006.

"No se puede ser un buen economista si no se es, también, un buen psicólogo. O un buen ingeniero sin saber la metafísica pertinente." Se trata de una frase extraída de la novela *La Isla*, de Aldous Huxley, y que encabeza el último libro de Joandomènec Ros, *Exploració, joc i reflexió*. ¿Ingeniería y metafísica? Puede parecer un oxímoron, o las credenciales de un tertuliano al uso, arrojado y aparentemente versado y versátil, aunque, en realidad, con pocas luces. Pero no. La frase encabeza el libro a modo de aviso para navegantes: no se puede entender este mundo tan complejo si no se dispone de cierto bagaje cultural, de cultura científica, en particular. No es suficiente saber mucho del campo de actuación en el que uno trabaja; debemos hacer el esfuerzo necesario para adquirir unos conocimientos mínimos de cultura científica. Una cultura que nos permita tener una opinión cabal sobre temas como las plantas transgénicas o la eutanasia, por ejemplo. Porque, entre otras cosas, tener una opinión cabal sobre esos temas nos hará más libres.



El libro de Joandomènec Ros es un manojo de ensayos, en su mayor parte publicados anteriormente de forma dispersa, que hablan de ciencia, de investigación, de la Universidad, de los políticos, de la sociedad. En la mejor tradición sistemática (no hay que olvidar que el autor es un avezado experto en el estudio de los bellísimos moluscos opistobranquios), los ensayos se hallan clasificados en diversas secciones. Dichas secciones tratan desde ámbitos muy generales, como el de "*Ciència, societat i política*", que se ocupa de cómo es percibida la ciencia por la sociedad y de la consideración que aquélla merece a los políticos, hasta temáticas más específicas, como la titulada "*Estudiar el Mare Nostrum*" en la que el autor, ecólogo marino además de experto en opistobranquios, pone orden a sus reflexiones sobre el Mediterráneo y sus habitantes marinos.

En medio, encontramos dos temas también muy queridos para el autor, "*Universitat i recerca*" y "*Divulgar la ciència*", donde nos habla de algunas de las grandezas y de las miserias de nuestro sistema de enseñanza superior, y de la manera como se hace divulgación de la ciencia y, más a menudo, cómo *no* se hace y por qué no se hace, un tema preocupante, por lo que ha quedado dicho arriba. En esa zona central del libro hallamos asimismo la sección "*Entre bromes i veres*", de carácter más alegre, que pintará más de una sonrisa en el rostro del lector. Con todo, no se trata en modo alguno de ejercicios de frivolidad. Aunque tratados con un aire desenfadado, se abordan temas tan serios como las nuevas alas del creacionismo en Estados Unidos o los límites de la experimentación animal.

Cierra el volumen la sección "*Home[not]s de ciència"*, ensayos sobre hombres de ciencia admirados por el autor, que empiezan con Charles Darwin y terminan, como no podría ser de otro modo, con Ramón Margalef. El autor, margalefiano incondicional, cierra el libro con un entrañable recuerdo de uno de los más grandes gigantes de la ciencia que ha dado este país. El título del libro de Ros, "*Exploració, joc i reflexió*", es también un homenaje a Margalef, ya que reproduce una frase suya incluida en la memorable conferencia *Meditació sobre la recerca a la Universitat*, que abrió el curso académico 1981-1982 de la Universidad de Barcelona. Las secciones del libro, aparte de la utilidad del orden, tienen la virtud de permitir al lector prescindir con poco esfuerzo de bloques temáticos que no le interesen. Sin embargo, este comentarista sugiere pasear y ramonear por todas las secciones, por el gusto de la variación, y porque todas contienen abundantes claves para incrementar nuestra cultura científica.

—XAVIER BELLÉS

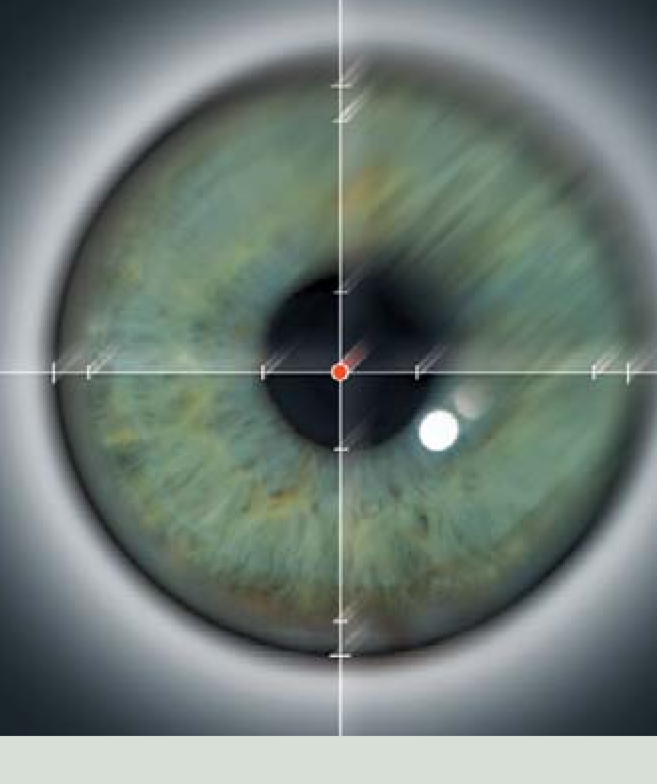
biológico: metabolismo, herencia, desarrollo, evolución, etcétera.

Todas las formas de vida que existen hoy en la Tierra contienen moléculas de ADN. Parecería, pues, que vivo sería todo aquello que porta dicho ácido nucleico. Si tan directo fuera, habría que considerar vivos una tortilla, una hamburguesa o una *vichyssoise*. No hay molécula alguna, ni siquiera el ADN, cuya presencia implique vida. Es más, aun cuando reuniéramos todos los tipos de moléculas poseídas por los organismos y los mezcláramos no resultaría una entidad viva. Deben, pues, existir otras condiciones. Pero no es tarea fácil identificarlas. Se citan la capacidad de reproducción, la plasticidad evolutiva, la exigencia de algún tipo de estructura que separe el cuerpo del individuo del mundo circundante, la capacidad de adaptarse al mundo externo a través de su interacción con el mismo, capacidad metabólica para persistir y cierto grado de autonomía. Todas ellas podrían considerarse condiciones necesarias para que algo pueda considerarse vivo. (No obstante, entre el número cada día creciente de especies moleculares asociadas a los procesos biológicos, algunas pueden considerarse imprescindibles. Pensemos en los genes.)

En los seres vivos ocurre a menudo que cada componente se comporta como si "conociera" el estado del conjunto. Por ejemplo, en el proceso de desarrollo, cuando el corazón alcanza cierto tamaño, las células dejan de dividirse. Lo mismo se observa en el hígado. No basta, pues, analizar los componentes por separado e intentar elucidar sus propiedades, sino que debe investigarse el modo en que esas propiedades individuales se hallan relacionadas con el todo.

—LUIS ALONSO





MOVIMIENTOS SACADICOS, por Susana Martínez-Conde y Stephen L. Macknik

Considerados antaño meros tics, ciertos movimientos oculares rápidos resultan básicos para la visión. Puede que también revelen pensamientos subliminales.

FISICA DEL CAMBIO CLIMATICO, por William Collins, Robert Colman, James Haywood, Martin R. Manning y Philip Mote

¿En qué pruebas se basan los expertos para afirmar que los humanos somos los responsables del calentamiento global?



PREDICCION DE INCENDIOS FORESTALES, por Patricia Andrews, Mark Finney y Mark Fischetti

El fuego arrasa cada año un número creciente de hectáreas. Se han desarrollado modelos matemáticos que facilitan la predicción y extinción de incendios.



ELECTROSENSIBILIDAD EN LOS TIBURONES, por R. Douglas Fields

Merced a un detector de campos eléctricos, los tiburones se dirigen con precisión hacia sus presas.



LA MELATONINA, por Juan M. Guerrero, Antonio Carrillo-Vico y Patricia J. Lardone

Sobre la glándula pineal y su producto, la melatonina, están trabajando varios equipos de investigación. En los próximos años deberían quedar aclarados sus mecanismos de acción y sus funciones.

